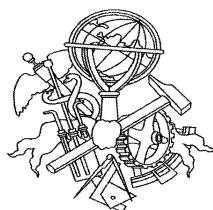


DESENVOLVIMENTO DE UM PEDÓMETRO PARA TELEMÓVEL

Ruben Tiago Vieira Dias



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2010

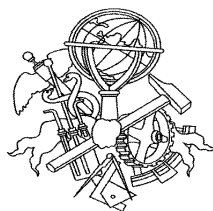
Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de
Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Candidato: Ruben Tiago Vieira Dias, Nº 1040172, 1040172@isep.ipp.pt

Orientação científica: Lino Manuel Baptista Figueiredo, LBF@isep.ipp.pt

Co-orientação: António José Matos Meireles, ajmm@isep.ipp.pt

Empresa: ISEP



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

9 de Dezembro de 2010

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Engenheiro Lino Figueiredo e Engenheiro António Meireles, pela dedicação e disponibilidade com que direccionaram e acompanharam este trabalho, assim como pelos comentários e sugestões.

Um agradecimento especial aos meus pais, por todo o apoio e incentivo concedido ao longo desta caminhada.

Resumo

Esta tese descreve o desenvolvimento do *hardware* e do *software* de um sistema com a capacidade de reconhecer o número de passos que uma pessoa efectua durante uma actividade física. O sistema consiste num acelerómetro controlado por um microcontrolador, que comunica com um dispositivo móvel através de Bluetooth. De modo a realizar o sistema foi necessário analisar uma vasta bibliografia, para conhecer o estado da arte desta tecnologia, entender o princípio de funcionamento do protocolo Bluetooth e os conceitos biomecânicos por detrás da marcha humana.

A proposta deste trabalho apresentava como elemento diferenciador do estado da arte o uso de um acelerómetro em conjunto com sensores de pressão. Com a conjugação destes sensores pretendia-se aumentar a precisão de um equipamento que normalmente não é reconhecido por essa característica. Contudo, a indisponibilidade dos sensores de pressão levou a que o sistema só fosse constituído pelo acelerómetro. Embora, o sistema foi projectado considerando que os sensores de pressão serão incluídos num futuro desenvolvimento.

Neste trabalho foram desenvolvidos dois algoritmos para detectar os passos que uma pessoa executa, com pé onde é colocado o sensor, quando caminha ou corre. Num dos testes realizados o algoritmo da “aceleração composta” detectou 84% dos passos, enquanto o algoritmo da “aceleração simples” detectou 99%.

A plataforma para a interface gráfica pretendia-se que fosse um telemóvel, contudo não foi possível obter um telemóvel que suporta-se o perfil SPP (*Serial Port Profile*), necessário para a comunicação com o módulo Bluetooth usado. A solução passou por usar como plataforma um computador portátil com Bluetooth, para o qual foi desenvolvido a aplicação “Pedómetro ISEP” em Visual Basic. O “Pedómetro ISEP” apresenta várias funcionalidades, entre elas destaca-se o cálculo da distância percorrida, da velocidade, e das calorias consumidas, bem como, o registo desses valores em tabelas e da possibilidade de desenhar os gráficos representativos do progresso do utilizador.

Palavras-Chave

Pedómetro, Bluetooth, Acelerómetro, Passos

Abstract

This thesis describes the hardware and software developed for a system with the ability to recognize the human steps during a physical activity. The system consists on an accelerometer controlled by a microcontroller which communicates with a mobile device via Bluetooth. In order to develop the system it was necessary to analyze an extensive bibliography, to know the state of the art of Pedometer technology, to understand the Bluetooth protocol working principle and to realize the biomechanical concepts behind the human gait.

This study as a differentiating element compared with similar approaches that is, the use of an accelerometer together pressure sensors. With this sensors combination it is intended to increase the precision of the system that normally is not recognized by this characteristic. However, the unavailability of sensors pressure meant that the system will only be formed by the accelerometer. Although, the system was designed considering that the pressure sensors will be included in future developments.

In this work it was developed two algorithms to detect the steps that a person performs when walking or running. In the field tests the algorithm of “composite acceleration” detected 84% of the steps, while the algorithm of “simple acceleration” detected 99%.

The platform for the graphical interface was intended to be a phone, but it was not possible to get a phone that supports the profile SPP (Serial Port Profile) required for communication with the Bluetooth module. To solve this problem it was used a laptop with Bluetooth protocol for which it was developed the interface “Pedómetro ISEP” in Visual Basic language. The “Pedómetro ISEP” presents several features, such as, calculation of distance traveled, speed, and calories consumed, as well as the recording of values in tables and the possibility of drawing graphs that shows the user progress.

Keywords

Pedometer, Bluetooth, Accelerometer, Steps

Résumé

Cette thèse décrit le développement d'un hardware et d'un logiciel d'un système capable de reconnaître le nombre de pas qu'une personne effectue pendant une activité physique. Le système est constitué d'un accéléromètre contrôlé par un dispositif de microcommande, qui communique avec un dispositif mobile à travers Bluetooth. Afin de réaliser le système il a fallu analyser une vaste bibliographie, pour connaître l'état de l'art de cette technologie, comprendre le début fonctionnement du protocole Bluetooth et les concepts biomécaniques derrière la marche humaine.

La proposition de ce travail présentait comme élément différentiateur de l'état de l'art l'utilisation d'un accéléromètre conjointement avec des capteurs de pression. Avec cette conjugaison de ces capteurs il se prétendait augmenter la précision d'un équipement qui normalement n'est pas reconnu par cette caractéristique. Toutefois, l'indisponibilité des capteurs de pression a fait que le système soit constitué uniquement de l'accéléromètre. Bien que le système a été conçu en considérant que les capteurs de pression seront inclus dans un futur développement.

Dans ce travail ont été développés deux algorithmes pour détecter les pas qu'une personne exécute, avec le microcontrôleur placé sur le pied, quand il marche ou court. Dans l'un des essais réalisés l'algorithme de "l'accélération composite" a détecté 84% des pas, tandis que l'algorithme de "l'accélération simple" a détecté 99%.

La plate-forme pour l'interface graphique était prévue d'être un téléphone portable, néanmoins n'a pas été possible d'obtenir un téléphone portable qui soit compatible avec le profil SPP (*Serial Port Profile*), nécessaire pour la communication avec le module Bluetooth utilisé. La solution a consisté à utiliser comme plate-forme pour l'interface graphique un ordinateur portable avec Bluetooth, pour lequel a été développé l'interface "Pedómetro ISEP" en langage Visual Basic. Le "Pedómetro ISEP" présente plusieurs fonctionnalités, entre autres le calcul de la distance parcourue, la vitesse, les calories consommées ainsi que l'enregistrement de ces valeurs dans des tableaux et la possibilité de créer les graphiques représentatifs du progrès de l'utilisateur.

Mots-clés

Podomètre, Bluetooth, Accéléromètre, Pas

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	V
RÉSUMÉ	VII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2. OBJECTIVOS	2
1.3. CALENDARIZAÇÃO	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. PEDÓMETROS.....	5
2.1. HISTÓRIA	5
2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	6
2.3. NIKE + IPOD	8
2.4. MI/COACH	9
2.5. CONCLUSÃO.....	12
3. BLUETOOTH.....	15
3.1. SPECIAL INTEREST GROUP	15
3.2. ORIGEM DO NOME E ÍCONE.....	16
3.3. ARQUITECTURA.....	16
3.4. PERFIS	28
3.5. BLUETOOTH <i>LOW ENERGY</i>	29
3.6. OUTRAS REDES	33
4. MARCHA HUMANA	39
4.1. CICLO DA MARCHA HUMANA.....	40
4.2. COLOCAÇÃO DOS SENSORES.....	44
4.3. CÁLCULO DE PARÂMETROS	45
5. HARDWARE	49

5.1.	UNIDADE DE PROCESSAMENTO	50
5.2.	MÓDULO BLUETOOTH.....	51
5.3.	SENSORES DE FORÇA	59
5.4.	ACELERÓMETROS	63
5.5.	FONTE DE ALIMENTAÇÃO	66
6.	PROTÓTIPO.....	69
6.1.	CIRCUITO ELÉCTRICO	69
6.2.	PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR	75
6.3.	INTERFACE GRÁFICA COM O UTILIZADOR	86
7.	TESTES REALIZADOS.....	93
7.1.	REDE BLUETOOTH	93
7.2.	VERIFICAÇÃO DA ACELERAÇÃO DURANTE A MARCHA.....	95
7.3.	CONSUMO DE ENERGIA.....	100
7.4.	RESULTADOS	101
8.	CONCLUSÕES	105
8.1.	TRABALHO FUTURO	106
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	109
	ANEXO A. SUMÁRIO DOS PACOTES BLUETOOTH	115
	ANEXO B. COMPARATIVO DE REDES WPAN.....	117
	ANEXO C. CIRCUITO ELÉCTRICO	119
	<i>HISTÓRICO.....</i>	123

Índice de Figuras

Figura 1	Diagrama do projecto.....	2
Figura 2	Pedómetro mecânico [5].	7
Figura 3	Pedómetro digital Omron HJ-112 [25].	8
Figura 4	Colocação do sensor Nike + iPod [22].....	9
Figura 5	Equipamento do miCoach (editado de [6]).	10
Figura 6	Logótipo do Bluetooth [12].....	16
Figura 7	Pilha protocolar do Bluetooth [14].	17
Figura 8	Bluetooth <i>piconet</i> [10].	19
Figura 9	Bluetooth <i>scatternet</i> [10].....	19
Figura 10	Transmissão <i>Multi-slot</i> [17].	20
Figura 11	Formato do pacote <i>Basic Rate</i> [17].....	21
Figura 12	Formato do pacote <i>Enhanced Data Rate</i> [17].	21
Figura 13	Formato do código de acesso [17].	22
Figura 14	Formato do cabeçalho [17].....	22
Figura 15	Máquina de estados Bluetooth [16].	24
Figura 16	Camadas inferiores da pilha protocolar Bluetooth [19].	26
Figura 17	Comunicação entre entidades L2CAP [20].	27
Figura 18	Topologia <i>practical mesh</i> do ANT [35].....	34
Figura 19	Camadas do padrão ZigBee [36].	35
Figura 20	Diferentes topologias de uma rede ZigBee [36].	37
Figura 21	Ciclo da marcha humana (adaptado de [43]).....	40
Figura 22	Ciclo da corrida (adaptado de [53]).	41
Figura 23	Comprimento do passo e da passada (adaptado de [42]).	42
Figura 24	Progresso do centro de pressão na planta do pé [53].	42
Figura 25	Sequência de apoio durante um passo [42].	43
Figura 26	Distribuição do peso pela planta do pé [53].	43
Figura 27	Centro de pressão na subida de escadas [53].....	44
Figura 28	Primeira configuração dos sensores de pressão (adaptado de [54]).....	44
Figura 29	Segunda configuração dos sensores de pressão (adaptado de [54]).....	45
Figura 30	Relação entre a velocidade e o consumo de oxigénio [68].	47
Figura 31	Interligação dos principais órgãos do sistema.	49
Figura 32	Módulo Bluetooth LMX9838 [61].	52
Figura 33	Diagrama de blocos do LMX9838 [58].	53
Figura 34	Implementação do <i>firmware</i> do LMX9838 [62].....	54

Figura 35	Fragmentação do pacote de comando [62].	56
Figura 36	Procedimento de “Inquiry” [62].	57
Figura 37	Procedimento de “Service Browse” (adaptado de [62]).	58
Figura 38	Procedimento de estabelecimento da ligação SPP (adaptado de [62]).	59
Figura 39	Modelo A201 do sensor FlexiForce [45].	60
Figura 40	Relação entre força e resistência do sensor FlexiForce [45].	60
Figura 41	Constituição do FSR da Interlink Electronics [46].	61
Figura 42	Relação entre resistência e a força do FSR da Interlink Electronics [46].	61
Figura 43	Interruptor flexível de membrana da Motion Lab Systems [47].	63
Figura 44	Sensor de força FX1901 [48].	63
Figura 45	Acelerómetro CMA 3000 VTI Technologies [49].	65
Figura 46	Constituição dos acelerómetros capacitivos [63].	65
Figura 47	Diagrama de blocos do acelerómetro LIS3LV02DL [52].	66
Figura 48	Bateria de lítio Lir2477 [64].	67
Figura 49	Bateria BL-5C de 3,7V [65].	67
Figura 50	Diagrama de blocos do TPS63031 [66].	68
Figura 51	Diagrama do protótipo.	70
Figura 52	Esquema de ligação do conversor <i>buck-boost</i> TPS63031 [66].	70
Figura 53	Circuito do microcontrolador.	71
Figura 54	Interface UART do módulo LMX9838 [62].	72
Figura 55	Circuito do módulo LMX9838.	73
Figura 56	Circuito do acelerómetro.	74
Figura 57	Configuração do tipo comparador [71].	74
Figura 58	Configuração do tipo divisor de tensão [71].	75
Figura 59	Fluxograma geral do programa.	76
Figura 60	Fluxograma do estabelecimento da ligação Bluetooth.	78
Figura 61	Aceleração composta com as componentes x e y.	80
Figura 62	Fluxograma do algoritmo da aceleração composta.	82
Figura 63	Fluxograma do algoritmo da aceleração simples.	83
Figura 64	Fluxograma para leitura do acelerómetro.	84
Figura 65	Fluxograma da interrupção originada por dados recebidos na USART.	85
Figura 66	Trama enviada por Bluetooth.	86
Figura 67	Estrutura da interface gráfica.	87
Figura 68	Separador “Pedómetro”.	88
Figura 69	Separador “Opções”.	89
Figura 70	Separador “Estatísticas”.	89
Figura 71	Separador “Gráfico”.	90
Figura 72	Sistema para teste da comunicação Bluetooth.	93
Figura 73	Criação de uma ligação SPP com o programa Simply Blue Commander.	94

Figura 74	Interface da pilha BlueSoleil.	95
Figura 75	Orientação dos eixos quando o protótipo é colocado no pé (adaptado de [67]).	96
Figura 76	Aceleração quando o protótipo está colocado no pé (caminhar).	97
Figura 77	Aceleração quando o protótipo está colocado no pé (correr).	98
Figura 78	Aceleração quando o protótipo está colocado na perna.	98
Figura 79	Aceleração quando o protótipo está colocado na anca.	99
Figura 80	Posição indicada para colocação do protótipo.	99
Figura 81	Pacotes de controlo [17].	115
Figura 82	Pacotes assíncronos [17].	115
Figura 83	Pacotes síncronos [17].	116
Figura 84	Esquemático do protótipo.	119
Figura 85	Placa de circuito impresso (por cima).	120
Figura 86	Placa de circuito impresso (por baixo).	120
Figura 87	Fotografia do protótipo desenvolvido.	122

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização do projecto.	3
Tabela 2	Características do miCoach Racer [6].	11
Tabela 3	Características do Heart Rate Monitor [6].	11
Tabela 4	Características do Stride Sensor [6].	12
Tabela 5	Bandas de frequência e canais Bluetooth [10].	18
Tabela 6	Características dos transmissores Bluetooth [10][15].	18
Tabela 7	Fase de apoio e fase oscilante [42].	41
Tabela 8	Relação entre a velocidade da passada e a altura do atleta [67].	46
Tabela 9	Estimativa dos equivalentes metabólicos para várias actividades [69].	47
Tabela 10	Principais características da PIC18F2550 e da PIC18F25J50 [56][57].	51
Tabela 11	Diferenças entre módulos Bluetooth [58][59][60].	52
Tabela 12	Comparação de acelerómetros [49][50][51][52].	64
Tabela 13	Seleção do <i>Baudrate</i> do LMX9838.	73
Tabela 14	Consumo de energia do protótipo.	100
Tabela 15	Resultados obtidos na contabilização de passos.	101
Tabela 16	Resultados obtidos na determinação da distância percorrida.	102
Tabela 17	Comparativo de redes WPAN	117
Tabela 18	Correspondência dos pinos do conector X2.	121
Tabela 19	Correspondência dos pinos do conector X3.	121
Tabela 20	Correspondência dos pinos do conector X4.	122

Acrónimos

ACL	–	<i>Asynchronous Connection-Less Link</i>
ARQ	–	<i>Automatic Retransmission Query</i>
ARQN	–	<i>Automatic Repeat Request Number</i>
ASCII	–	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BCC	–	<i>Block Check Character</i>
Ble	–	<i>Bluetooth low energy</i>
CAC	–	<i>Channel Access Code</i>
CID	–	<i>Channel Identification</i>
CPU	–	<i>Central Processing Unit</i>
CRC	–	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CTS	–	<i>Clear To Send</i>
DAC	–	<i>Device Access Code</i>
DEE	–	Departamento de Engenharia Electrotécnica
DLCI	–	<i>Data Link Connection Identifier</i>
EDR	–	<i>Enhanced Data Rate</i>
EEPROM	–	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
ESCO	–	<i>Extended Synchronous Connection-Oriented Link</i>
FDD	–	<i>Full-Function Device</i>

FEC	– <i>Forward Error Correction</i>
FHS	– <i>Frequency Hopping Synchronization</i>
FHSS	– <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FIFO	– <i>First In, First Out</i>
FM	– <i>Frequency Modulation</i>
FSR	– <i>Force Sensing Resistors</i>
GAP	– <i>Generic Access Profile</i>
GFSK	– <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GOEP	– <i>Generic Object Exchange Profile</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
HAN	– <i>Home Area Network</i>
HCI	– <i>Host Controller Interface</i>
HEC	– <i>Header Error Check</i>
HSP	– <i>Headset Profile</i>
I2C	– <i>Inter-Integrated Circuit</i>
IAC	– <i>Inquiry Access Code</i>
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	– <i>Internet Protocol</i>
IrDA	– <i>Infrared Data Association</i>
ISEP	– <i>Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
ISM	– <i>Industrial Scientific Medical</i>

L2CAP	<i>Logical Link Control and Adaptation Layer</i>
LED	– <i>Light Emitting Diode</i>
LMP	– <i>Link Manager Protocol</i>
MAC	– <i>Media Access Control</i>
MEEC	– <i>Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores</i>
MEMS	– <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MET	– <i>Metabolic Equivalent</i>
NVS	– <i>Non-Volatile Storage</i>
OBEX	– <i>OBject EXchange</i>
OSI	– <i>Open Systems Interconnection</i>
PAN	– <i>Personal Area Network</i>
PC	– <i>Personal Computer</i>
PCM	– <i>Pulse-Code Modulation</i>
PDA	– <i>Personal Digital Assistant</i>
PDU	– <i>Protocol Data Units</i>
PHY	– <i>Physical Layer</i>
PIC	– <i>Programmable Interface Controller</i>
PPP	– <i>Point-to-Point Protocol</i>
PSK	– <i>Phase-Shift Keying</i>
PWM	– <i>Pulse Width Modulation</i>
QoS	– <i>Quality of Service</i>

RAM	– <i>Random Access Memory</i>
RFCOMM	– <i>Radio Frequency Communication</i>
RFD	– <i>Reduced Function Device</i>
RMR	– <i>Resting Metabolic Rate</i>
RTC	– <i>Real-Time Clock</i>
RTCC	– <i>Real Time Clock and Calender</i>
RTS	– <i>Ready To Send</i>
RX	– <i>Receive input</i>
SCO	– <i>Synchronous Connection-Oriented Link</i>
SDAP	– <i>Service Discovery Application Profile</i>
SDP	– <i>Service Discovery Protocol</i>
SIG	– <i>Special Interest Group</i>
SMD	– <i>Surface Mount Devices</i>
SPP	– <i>Serial Port Profile</i>
SYNC	– <i>Synchronization Profile</i>
TCP	– <i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	– <i>Time Division Duplex</i>
TRS	– <i>Tip Ring Sleeve</i>
TX	– <i>Transmit output</i>
UART	– <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
ULP	– <i>Ultra Low Power</i>

UPnP	– <i>Universal Plug and Play</i>
USART	– <i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
USB	– <i>Universal Serial Bus</i>
UWB	– <i>Ultra-Wideband</i>
WAP	– <i>Wireless Application Protocol</i>
WPAN	– <i>Wireless Personal Area Network</i>
XML	– <i>eXtensible Markup Language</i>

1. INTRODUÇÃO

O pedómetro é um aparelho que é usado por uma pessoa para medir o número de passos. *Pedómetro* é um híbrido do Latim *pedis* significando “pé” e do Grego *metron* significando “medida” [1]. É usado geralmente por pessoas que pretendem medir o seu exercício diário. Os pedómetros modernos para além de contar o número de passos, também calculam a distância percorrida [2].

O uso do pedómetro é uma das maneiras mais eficazes de uma pessoa ganhar o hábito de caminhar ou correr, ao mesmo tempo que se diverte. Para além de encorajar a levar um estilo de vida saudável e perder peso, é um dispositivo prático, leve e discreto. Tanto pode ser usado num exercício físico específico, como pode servir para acompanhar no dia-a-dia. Quer no trabalho ou lazer, um pedómetro pode monitorizar o esforço das actividades, com alguma precisão, permitindo acompanhar o esforço realizado com vista a atingir um objectivo.

É um equipamento que não é conhecido pela sua precisão, dado que, um toque ou abanar durante o exercício, pode provocar uma alteração do ritmo de funcionamento do componente mecânico que o constitui (pedómetros mecânicos), provocando uma contagem errada de passos. Nos dias de hoje, os pedómetros dependem de sensores inerciais micro-electromecânicos (MEMS) e de *software* sofisticado para detectar os passos. Apresentando ainda assim, um erro que ronda os 5 a 10%. Contudo, uma má colocação do equipamento, o tipo de fisionomia e o estilo de corrida da pessoa são sempre factores que se deve ter em conta na variação da contagem de passos. Acima de tudo é essencial conhecer o princípio de funcionamento do pedómetro, de modo a ser usado correctamente [3].

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este projecto surge no âmbito da disciplina Tese/Dissertação, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, com o objectivo de desenvolver um sistema de detecção de passos, realizados por uma pessoa. O sistema deverá recorrer ao uso de sensores MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) para obter os dados necessários e estabelecer uma comunicação Bluetooth com um dispositivo móvel, de modo a visualizar a informação resultante (Figura 1).

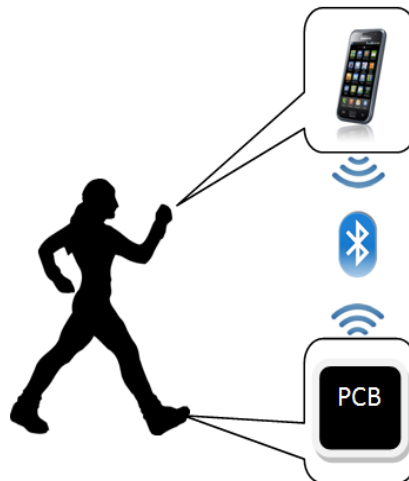


Figura 1 Diagrama do projecto.

1.2. OBJECTIVOS

O principal objectivo deste projecto consiste no desenvolvimento de um sistema que permita efectuar a monitorização dos passos de uma pessoa. Este desenvolvimento está dividido nas seguintes tarefas:

- Estudo de pedómetros existentes no mercado e das tecnologias que incorporam;
- Estudo do protocolo de comunicação Bluetooth e comparação com tecnologias concorrentes;
- Estudo dos sensores envolvidos (acelerómetros e sensores de pressão);
- Estudo da marcha e corrida humana;
- Desenvolvimento de um circuito baseado num microcontrolador e num módulo de comunicação Bluetooth, que permita a comunicação com um telemóvel;
- Desenvolvimento de uma aplicação para telemóvel que permita disponibilizar diversos tipos de informação relativa ao passo de uma pessoa (tempo de exercício, distância percorrida, calorias consumidas, etc.).

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A planificação temporal de todas as tarefas previstas para a realização deste trabalho está exposta na Tabela 1.

Tabela 1 Calendarização do projecto.

ID	Nome da Tarefa	Início	Conclusão	Duração	Q4 09		Q1 10			Q2 10			Q3 10			
					Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	
1	Pesquisa e Estudo da documentação	02-11-2009	29-01-2010	65d												
2	Estudo sobre pedómetros existentes	02-11-2009	27-11-2009	20d												
3	Estudo sobre BlueTooth e tecnologias concorrentes	30-11-2009	08-01-2010	30d												
4	Estudo sobre os sensores a utilizar	11-01-2010	22-01-2010	10d												
5	Estudo da Marcha humana	25-01-2010	29-01-2010	5d												
6	Elaboração do relatório intermédio	01-02-2010	26-02-2010	20d												
7	Desenvolvimento do protótipo	01-03-2010	11-06-2010	75d												
8	Montagem em placa de ensaio do circuito de testes	01-03-2010	05-03-2010	5d												
9	Desenvolvimento do programa para o microcontrolador	08-03-2010	02-04-2010	20d												
10	Desenvolvimento da aplicação para telemovel	05-04-2010	30-04-2010	20d												
11	Desenvolvimento da placa de circuito impresso	03-05-2010	11-06-2010	30d												
12	Fase de testes	07-06-2010	30-07-2010	40d												
13	Optimização do programa para microcontrolador	07-06-2010	02-07-2010	20d												
14	Optimização da aplicação para telemóvel	05-07-2010	30-07-2010	20d												
15	Elaboração do relatório final	02-08-2010	24-09-2010	40d												

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório é constituído por oito capítulos. No Capítulo 1 é feita uma breve introdução à temática abordada, e exposta a planificação das tarefas e objectivos a atingir. No Capítulo 2 é explicada a tecnologia incorporada nos pedómetros existentes no mercado. No Capítulo 3 é feita uma abordagem detalhada do protocolo Bluetooth. No Capítulo 4 é analisado o modelo, sendo abordados os aspectos relevantes da marcha humana, necessários para uma boa aquisição de dados. No Capítulo 5 é apresentada a pesquisa feita para a escolha do *hardware* adequado para a montagem do sistema. No Capítulo 6 são descritos todos os aspectos relacionados com o protótipo desenvolvido, nomeadamente o circuito eléctrico, o programa para o microcontrolador e a interface gráfica. No Capítulo 7 são apresentados os testes efectuados, problemas encontrados e soluções adoptadas. Por fim, no Capítulo 8, são reunidas as principais conclusões, resultantes do desenvolvimento deste projecto, e perspectivados futuros desenvolvimentos.

2. PEDÓMETROS

O princípio básico associado ao mecanismo de contagem de passos está relacionado com o facto de quando uma pessoa se move inclina-se um pouco, resultando na descida do seu centro de gravidade. Para cada passo, primeiro o centro de gravidade desce e depois sobe, este movimento descendente e ascendente continua durante toda a caminhada [2].

Os pedómetros comercialmente disponíveis usam vários mecanismos diferentes para contabilizar o número de passos dados por uma pessoa enquanto anda. Neste Capítulo é analisada a evolução tecnológica dos pedómetros, começando pelos simples pedómetros mecânicos, passando por pedómetros electrónicos e terminando com o novo conceito de *Personal Workout Assistant* (Nike+ e miCoach).

2.1. HISTÓRIA

A invenção do pedómetro é frequentemente atribuída a Thomas Jefferson, o terceiro presidente dos Estados Unidos da América e escritor da Declaração da Independência. Existe, no entanto, algumas dúvidas se realmente Jefferson inventou ou adaptou um modelo que trouxe de França. Isto deve-se ao facto de Jefferson não patentear os seus inventos, porque acreditava que os inventos deviam ser utilizados para o avanço do povo e não do inventor [1][4]. Contudo, recuando na história, verifica-se que em pinturas do século XV, de Leonardo Da Vinci, revelavam a ideia de um dispositivo para monitorizar a

distância percorrida, a pé, por um soldado Romano. Era um dispositivo que Leonardo da Vinci usaria para fazer mapas e medir distâncias com alguma precisão [4][7][8].

O programa *10000 Steps-A-Day* foi desenvolvido em 1965 no Japão pelo Dr. Hatano, que criou um pedómetro com o nome “manpo-kei” (significando “10,000 steps meter”) [4]. O programa começou como uma maneira de pôr as pessoas em movimento e para que as pessoas comesçassem a pensar em levar um estilo de vida activo em tudo o que fazem [9].

O número de 10000 passos por dia foi durante vários anos recomendado pelo US Surgeon General (chefe operacional do serviço de saúde pública dos Estados Unidos da América). Sendo este número o equivalente a 30 minutos de caminhada em passo rápido. O Instituto Cooper calculou que em caminhada rápida (5 km/h), 7000 passos por dia (mínimo), até 10000 passos por dia (óptimo), seria fácil atingir o objectivo de 30 minutos de actividade física diária [9].

2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Existem duas categorias principais de pedómetros: mecânicos e electrónicos. Em qualquer dos casos, o movimento e/ou passos são registados pelo balancear das ancas ou pela vibração que ocorre quando os pés batem no chão. Nesta secção são explicados alguns dos pedómetros mais comuns no mercado.

2.2.1. PEDÓMETROS MECÂNICOS

Os pedómetros mecânicos ou analógicos, mais comuns, dependem da oscilação de um pêndulo. São constituídos por um contrapeso, uma mola, e um braço no qual o contrapeso é anexo, para detectar as vibrações. Este tipo de pedómetro é sensível o suficiente para detectar as vibrações criadas ao caminhar, contando e fazendo um som (“clique”) a cada passo dado. São também muito susceptíveis a erros, visto que, abanando as ancas, a vibração de um automóvel enquanto se conduz, ou até abanando o pedómetro, pode contabilizar uns passos extra [1]. Na Figura 2 pode-se observar um pedómetro mecânico do início do século XX, com capacidade de medir até 10 milhas.



Figura 2 Pedómetro mecânico [5].

Existem outros tipos de pedómetros mecânicos, como por exemplo, os de mecanismo de bola, no qual uma bola é colocada num tubo vertical, oscilando para cima e para baixo em cada passo e assim efectuar a contagem. Outro mecanismo é o da mola com íman, onde a mola contrai a cada passo originado a aproximação do íman a um interruptor magnético, que regista o passo [2].

2.2.2. PEDÓMETROS ELECTRÓNICOS

Os pedómetros electrónicos ou digitais (Figura 3) melhoraram a precisão em relação aos mecânicos, através do uso de um acelerómetro para determinar o movimento. O acelerómetro não é um simples *on/off* como os pedómetros mecânicos, conseguindo medir (em silêncio) se um passo é forte ou leve. Por estas razões, os pedómetros digitais com acelerómetros são os dispositivos mais precisos para contar passos. No entanto, existem alguns inconvenientes, como a duração mais curta da vida da bateria (tipicamente 6 meses para 10000 passos por dia) e o preço mais elevado [1].

Os pedómetros até agora referenciados têm como função principal contar os passos e apresentar a informação relativa aos passos efectuados. Sendo a cintura do atleta o local mais indicado para o seu uso. Com o evoluir da tecnologia, foram aparecendo sistemas que apresentam um maior número de funcionalidades, tais como: leitor de MP3, rádio, assistente de treino e capacidade para avaliar o consumo de energia de diversas actividades (corrida, ciclismo, canoagem, etc.). O local correcto para colocação destes sistemas pode não ser a cintura, variando de acordo com o exercício a ser praticado, por exemplo, para

medir a actividade de um ciclista o local apropriado é a coxa [70]. Com este tipo de características destacam-se os dispositivos: Philips Activa [70], Nike+ (secção 2.3) e miCoach (secção 2.4).



Figura 3 Pedómetro digital Omron HJ-112 [25].

Dentro da categoria de pedómetro electrónicos também se pode considerar os relógios com pedómetro e as aplicações de telemóvel, que recorrem ao acelerómetro embutido no aparelho para contar os passos.

Esta é também a categoria na qual se insere o pedómetro que se pretende desenvolver neste trabalho.

2.3. NIKE + IPOD

Em Maio de 2006 foi apresentado pela Nike em conjunto com a Apple um novo conceito de pedómetro, o Nike+iPod. Deixando de ser só um dispositivo, este pedómetro é constituído por um acelerómetro piezoelectrico com um transmissor (sensor Nike+) e por um receptor sem fios que é conectado ao leitor de MP3 da Apple (iPod nano).

O sensor monitoriza a passada enquanto uma pessoa anda ou corre e determina a quantidade de tempo que o pé permanece no chão. Sendo o tempo de contacto directamente proporcional ao ritmo. O sensor comunica sem fios com o receptor através de um protocolo de rádio proprietário, de baixo consumo de energia, na banda de 2,4 GHZ.

O sensor deve ser colocado num receptáculo das sapatilhas compatíveis com o Nike+ (Figura 4). Tendo de ser substituído sempre que a bateria acaba, aproximadamente passado 1000 horas de uso activo, avisando duas semanas antes do fim [24].

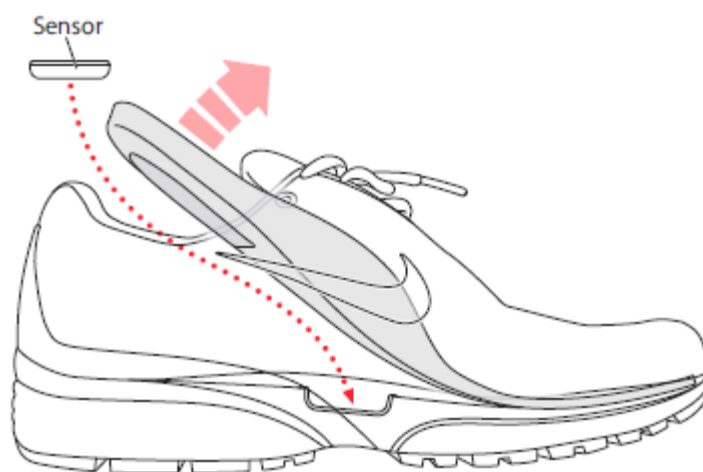


Figura 4 Colocação do sensor Nike + iPod [22].

Este sistema consegue medir a distância percorrida pela maioria dos atletas com uma precisão de 90%, com a calibração de fábrica. Contudo, pode ser calibrado para o tipo de passada de cada pessoa, de modo a aumentar a precisão [24].

A integração com o iPod, para além de permitir a visualização em tempo real da informação relativa a corrida (distância, número de passos, tempo de corrido, etc), também permite configurar um programa de treino, isto é, através da navegação nos menus do iPod é possível definir um objectivo, podendo ser uma distância específica, queimar um número de calorias, ou exercitar durante um tempo específico [23].

Em conjunto com a apresentação do equipamento também foi lançada a página da Internet Nike+. Esta página permite que o utilizador carregue os dados estatísticos do seu exercício de modo a poder gerir o seu progresso e programar novos treinos [23].

Em Junho de 2008 foi lançada a Sportband, um componente extra que dispensa a utilização do iPod para registar a informação do treino. Este componente é constituído por uma pulseira de borracha com um receptor. No fim do treino pode-se ligar ao PC de modo a carregar os dados para a página da Internet Nike+. A utilização do iPod e do transmissor de se conectar ao iPod também deixou de ser necessária com o lançamento do iPod Touch e iPhone 3GS, que trazem embutido o transmissor compatível com o Nike+ [23].

2.4. MI COACH

Durante o mês de Março de 2008, a Adidas juntamente com a Samsung apresentaram o miCoach. É um sistema que partilha a mesma ideia do Nike + iPod, motivar as pessoas a

correr através da recolha dos dados estatísticos da corrida. Isto é, efectua um estímulo durante o exercício, através de um *feedback* de voz dos dados e tendo também a capacidade de sincronizar esses dados com uma página da Internet, de modo a registar o progresso. Contudo, os dois sistemas apresentam algumas diferenças. Enquanto o Nike+ utiliza o iPod, o miCoach utiliza o telemóvel F110 da Samsung. O miCoach apresenta um sistema mais avançado, em que privilegia um maior número de funcionalidades (mais de 200 opções de treino), um sistema de *feedback* de voz mais completo e um *website* mas dirigido para o utilizador profissional (maior detalhe de informação). Por sua vez, o Nike+ privilegia a simplicidade e a partilha de informação em comunidade [26].

O sistema miCoach é constituído por três dispositivos (Figura 5): miCoach Racer, Heart Rate Monitor (sensor de frequência cardíaca) e o Stride Sensor (sensor de passo).

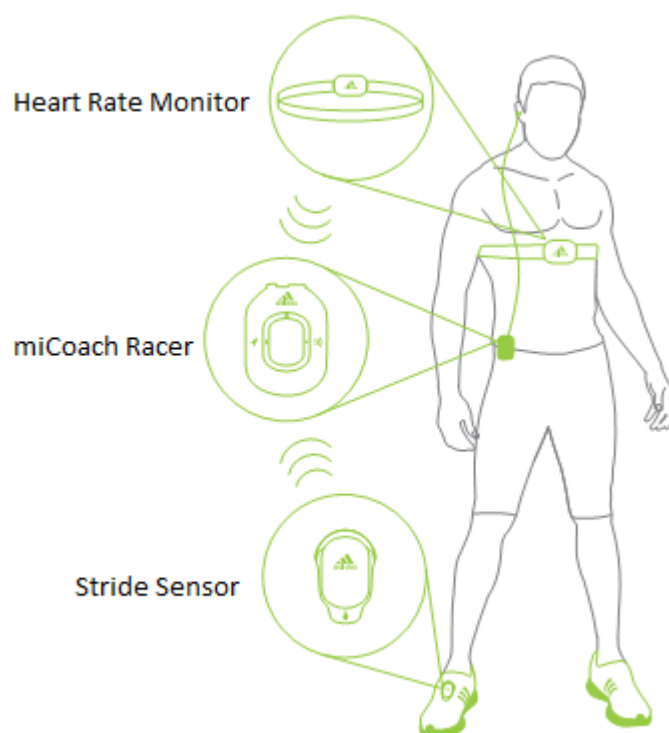


Figura 5 Equipamento do miCoach (editado de [6]).

2.4.1. MI COACH RACER

O miCoach Racer é o órgão central, que comunica (sem fios) com o Heart Rate Monitor e com o Stride Sensor, de modo a recolher os dados do exercício. Durante o exercício será reproduzido através do auricular: o tempo decorrido, as calorias consumidas, o ritmo cardíaco, a distância percorrida, o número de passos e a cadência de passo. Estes dados podem posteriormente ser sincronizados com uma página da Internet, de modo a se poder

registar as melhorias. Não sendo o telemóvel um equipamento necessário ao funcionamento do sistema, este dispositivo pode ser conectado ao telemóvel F110 da Samsung, que possui a aplicação para visualização e configuração do treino em tempo real. Por outro lado miCoach Racer também pode ser conectado a qualquer leitor de MP3 para se ouvir música durante o treino. Na Tabela 2 são apresentadas as principais características técnicas deste dispositivo.

Tabela 2 Características do miCoach Racer [6].

Tamanho	56 mm x 41 mm x 16,75 mm
Peso	22,9 g
Interface de áudio	Jack de 3,5 mm
Potência	Bateria de polímero de lítio de 125 mAh
Duração da bateria	10 horas
Tempo de carga por USB	2 horas
Comunicação do sensor	ANT+ a 2,4 GHz
Alcance	< 2,5 m
Conexão com o PC	1/8" TRS para conexão USB da série 'A'

2.4.2. HEART RATE MONITOR

O Heart Rate Monitor fornece os dados da frequência cardíaca durante os exercícios. Funciona em conjunto com a tira têxtil transmissora ou com vestuário de sensoramento cardíaco, compatível com o Adidas miCoach.

O Heart Rate Monitor está em modo de espera e é activado através da aplicação de um estímulo aos eléctrodos. A tira transmissora deve ser colocada a volta do tronco e abaixo do peito, de modo a que os eléctrodos fiquem mais ou menos centrados no corpo. Na Tabela 3 estão reunidas as principais características técnicas deste sensor.

Tabela 3 Características do Heart Rate Monitor [6].

Tamanho	63 mm x 38 mm x 10,5 mm
Peso	19,5 g
Potência	Pilha de lítio CR2032
Duração da bateria	1000 horas de vida activa (2,8 anos a 1 h/dia)
Comunicação do sensor	ANT+ a 2,4 GHz
Alcance	< 2,5 m
Escala de medição	15 a 240 bpm

2.4.3. STRIDE SENSOR

O Stride Sensor é o equipamento (composto por um acelerómetro de três eixos) que fornece durante o exercício informação sobre: velocidade, distância, número de passos e a cadência de passo. Pode ser colocado nos atacadores da sapatilha ou na entressola de sapatilhas compatíveis. Na Tabela 4 estão reunidas as principais características técnicas deste sensor.

Tabela 4 Características do Stride Sensor [6].

Tamanho	34 mm x 23 mm x 8 mm
Peso	8 g
Gama de velocidades	3,6 km/h até 19,8 km/h
Potência	Pilha de lítio CR2032
Duração da bateria	> 5 meses
Comunicação do sensor	ANT+ a 2,4 GHz
Alcance	< 2,5 m
Precisão velocidade/distância (calibrado)	97%
Precisão velocidade/distância (sem calibração)	95%

2.5. CONCLUSÃO

A escolha de um pedómetro depende sobretudo do tipo de uso que se lhe vai dar e do orçamento disponível para a sua compra. Para uma pessoa que pretende um pedómetro para usar ocasionalmente, de modo registar o passos efectuados e porventura verificar o consumo energético do exercício, um pedómetro digital com um preço até 20 € serve para o efeito. Se o pedómetro for para um uso mais intensivo, que disponibilize um maior número de funcionalidades, e permita guardar e processar informaticamente a informação do exercício, um sistema como o Nike+ ou o miCoach é o indicado. Estes dois sistemas são concorrentes, no entanto, pode ser distinguido dois tipos de utilizador alvo. O Nike+ apela mais a um utilizador jovem e ocasional. Visto ter um preço a rondar os 30 €, utilizar um sensor descartável, ter uma elevada integração com as redes sociais, precisar de calçado apropriado para acolher o sensor e o *feedback* de voz ser só informativo. O miCoach é mais indicado para o utilizador profissional, visto que, o preço ronda os 100 €, apresenta um maior detalhe informativo, disponibiliza diferentes planos de treino que para

além de informar aconselha o ritmo a seguir, permite a substituição da bateria dos sensores, não necessita de leitor de MP3 e de calçado compatível para funcionar.

No que diz respeito a precisão, verifica-se o abandono dos pedómetros analógicos e uma clara predominância dos pedómetros digitais. Contudo a precisão dos valores apresentados pela maioria dos pedómetros digitais pode estar limitada ao valor do número de passos. Isto porque, o cálculo da distância percorrida depende do comprimento do passo, que pode ser obtido através de vários métodos. Os métodos mais usuais para determinar o comprimento do passo são os seguintes: valor inserido pelo utilizador, valor médio obtido por estatística populacional (normalmente usada na calibração de fábrica), relação entre a altura do atleta e o comprimento do passo, e percorrendo uma distância conhecida a uma velocidade constante. Também se verifica que em muitos casos o valor usado é fixo, não tendo em consideração a variação da velocidade do atleta durante o percurso. Assim, o valor da distância percorrida apresentado pode divergir bastante entre equipamentos e do valor real. Este valor pode assumir uma maior relevância se for usado para calcular a velocidade do atleta e as calorias consumidas.

3. BLUETOOTH

A tecnologia Bluetooth visa permitir comunicações sem fios de curto alcance entre vários dispositivos. Foi originalmente desenvolvido pela Ericsson e as suas especificações têm vindo a evoluir através da manutenção e desenvolvimento proporcionado pelo *Special Interest Group* (SIG), tendo sido padronizado pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), com a referência IEEE 802.15.1 [10].

Actualmente, a especificação Bluetooth encontra-se na versão 4.0 (*Low Energy*). No entanto, a versão analisada neste Capítulo é a 2.1 + EDR (*Enhanced Data Rate*), sendo presentemente esta a versão com mais penetração de mercado e aquela que está presente nos telemóveis de hoje em dia. Contudo, as versões são retro-compátíveis, podendo um equipamento da versão 2.1 comunicar com um da versão 3, à velocidade suportada pelo primeiro.

3.1. SPECIAL INTEREST GROUP

Em 1994, a Ericsson Mobile Communications lançou um estudo de viabilidade sobre uma interface de rádio de baixo custo e baixo consumo, para ser utilizada entre telemóveis e os seus acessórios. Em Fevereiro de 1998, IBM, Intel, Nokia e Toshiba juntaram-se à companhia Sueca, e em Maio criaram a SIG. No ano 2000 foi ampliada com a adesão de mais empresa de renome, como a 3Com, Agere (Lucent Technologies), Microsoft e

Motorola, e desde então não parou de aumentar. Assim os actores reunidos abrangem diversos campos do conhecimento, tais como telemóveis, computadores portáteis, automóveis e processamento digital. Sendo uma especificação industrial aberta, todos os membros da Bluetooth SIG podem usá-lo gratuitamente, nos seus produtos e serviços. Actualmente, o SIG tem mais 12000 membros que promovem esse padrão, apesar do grande número de tecnologias concorrentes [10][11].

3.2. ORIGEM DO NOME E ÍCONE

O nome Bluetooth surgiu em homenagem ao um rei Viking do século X, o Dinamarquês chamado Harald Blatand (Harald Bluetooth, em inglês). Esse rei foi fundamental para a unificação de facções do que são hoje a Noruega, Suécia e Dinamarca. A metáfora deriva da tecnologia Bluetooth pretender unir fabricantes de indústrias distintas em torno do seu padrão [11].

O logótipo (Figura 6) é também baseado na história, pois é composto por dois caracteres "H" e "B" abreviatura: de "Harald Bluetooth".



Figura 6 Logótipo do Bluetooth [12].

3.3. ARQUITECTURA

O intuito da especificação Bluetooth é permitir que dispositivos de fabricantes distintos se interliguem de forma compatível e inter-operável. Por isso, não é apenas suficiente a existência do sistema de rádio em *hardware*, havendo também a necessidade de uma complexa pilha protocolar em *software* para garantir o correcto funcionamento [13].

A pilha protocolar do Bluetooth está dividida em duas partes: inferior e superior. As camadas que compõem a pilha protocolar estão ilustradas na Figura 7. Fazem parte da parte inferior a camada de rádio, a camada de banda base, controlador de ligação e o protocolo de gestão de ligação, enquanto na parte superior estão contidas a camada L2CAP (*Logical Link Control and Adaptation Layer*), RFCOMM (*Radio Frequency Communication*), OBEX (*OBject EXchange*), e os perfis.

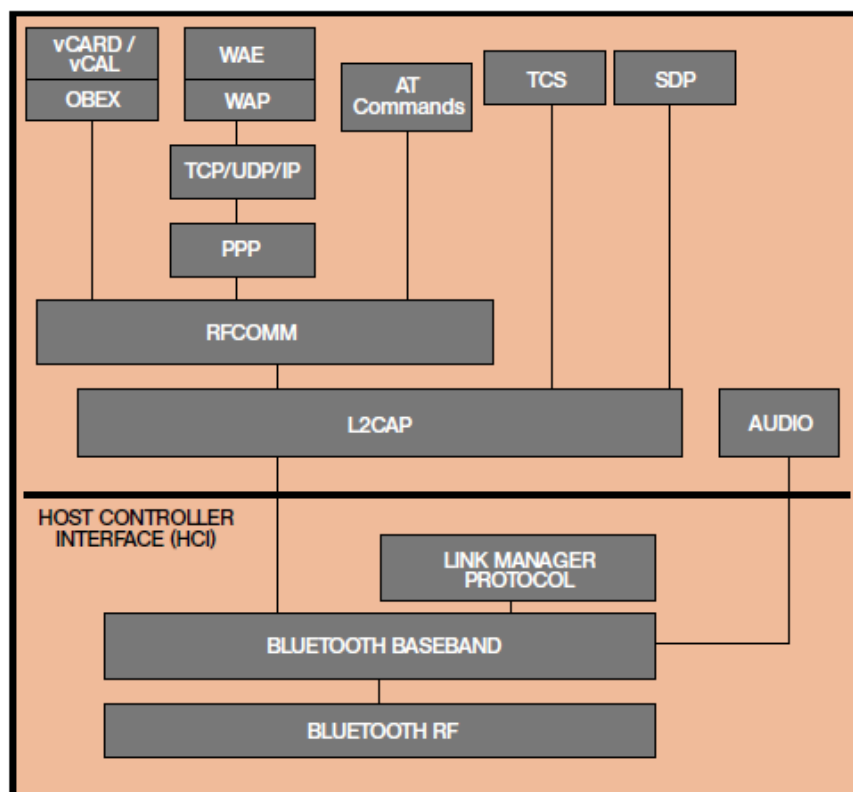


Figura 7 Pilha protocolar do Bluetooth [14].

3.3.1. CAMADA DE RÁDIO

Os dispositivos Bluetooth operam na banda não licenciada de 2,4 GHz ISM (*Industrial Scientific Medical*). Sendo aplicado um transceptor de *hop* de frequência (salto de frequência) para combater a interferência e o desvanecimento.

São definidos dois modos de modulação. Um modo obrigatório, chamado *Basic Rate*, que usa uma forma de modulação FM (*Frequency Modulation*) binária para minimizar a complexidade do transceptor. Um modo opcional chamado *Enhanced Data Rate*, que usa uma modulação PSK (*Phase-Shift Keying*). A taxa de transmissão é de 1 Mbps para o *Basic Rate*, e no máximo 3 Mbps para o *Enhanced Data Rate*.

Para garantir uma transmissão bidireccional é utilizado um esquema de *Time Division Duplex* (TDD) nos dois modos. Esta especificação define os requisitos para a camada de rádio para os modos *Basic Rate* e *Enhanced Data Rate* [15].

A banda ISM de 2,4 GHz está disponível globalmente para livre uso, tendo a maioria dos países reservado 83,5 MHz para este protocolo, sendo possíveis neste intervalo 79 canais

com 1 MHz de banda por canal. No entanto, alguns países como a Espanha e França reservam menos banda (Tabela 5).

Tabela 5 Bandas de frequência e canais Bluetooth [10].

Países	Intervalo de frequência (MHz)	Canais (MHz)	
Europa⁽¹⁾ e Estados Unidos	2400 - 2483,5	$f = 2402 + k$	$k = 0, \dots, 78$
França	2446,5 - 2483,5	$f = 2454 + k$	$k = 0, \dots, 22$
Espanha	2445 - 2475	$f = 2449 + k$	$k = 0, \dots, 22$

(1) Maioria dos países da Europa.

O Bluetooth utiliza a *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), em que a portadora salta de frequência e frequência de acordo com uma sequência predefinida. São utilizados *hops* (saltos) de frequência pelos 79 ou 23 canais, a uma taxa de 1600 *hops* por segundo, para diminuir a interferência com outras fontes que utilizem a mesma banda. A velocidade atingida chega a 1 Mbps usando a modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), com o produto tempo-largura de banda (*bandwidthbit period*) igual a 0,5 [15].

Os dispositivos transmissores são divididos em 3 classes de potência, conforme a Tabela 6. A classe 1 foi projectada para dispositivos com elevado alcance, como os pontos de Acesso Bluetooth. A classe 2 para dispositivos com um alcance médio, como os PCs, portáteis e telemóveis. Enquanto a classe 3 para dispositivos de baixo consumo [10].

Tabela 6 Características dos transmissores Bluetooth [10][15].

Classe de Potência	Potência Máxima	Potência Mínima	Alcance
1	100 mW (20 dbm)	1 mW (0 dbm)	~100 m
2	2,5 mW (4 dbm)	0,25 mW (- 6 dbm)	~10 m
3	1 mW	-	<1 m

3.3.2. CAMADA DE BANDA BASE

A banda base é a parte do sistema Bluetooth que especifica ou implementa o acesso ao meio e da camada física entre dispositivos.

Dois ou mais dispositivos que partilham o mesmo canal físico formam uma *piconet* (Figura 8). Um dispositivo Bluetooth actua como *master* da *piconet*, enquanto os outros actuam

como *slaves*. Podem estar até sete *slaves* activos na *piconet*. Adicionalmente, muitos outros podem estar conectados em estado *parked* (modo de poupança de energia) [16].

As *piconets* têm uma forma de rede em estrela, onde o *master* actua como nó central. Duas ou mais *piconets* podem ser interligadas, formando assim uma *scatternet* (Figura 9). As conexões são formadas por nós ponte (*bridge*), que fazem parte de duas ou mais *piconets*. Um *bridge* fica numa *piconet* algum tempo e pode mudar para outra através da troca da sua sequência de *hops*. Este nó tanto pode ser *slave* em duas *piconets* como ser *slave* numa e *master* na outra [10].

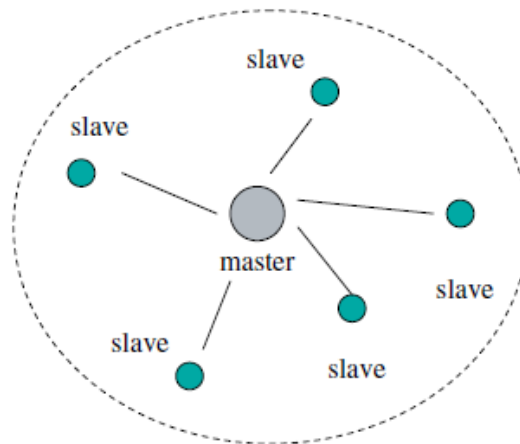


Figura 8 Bluetooth *piconet* [10].

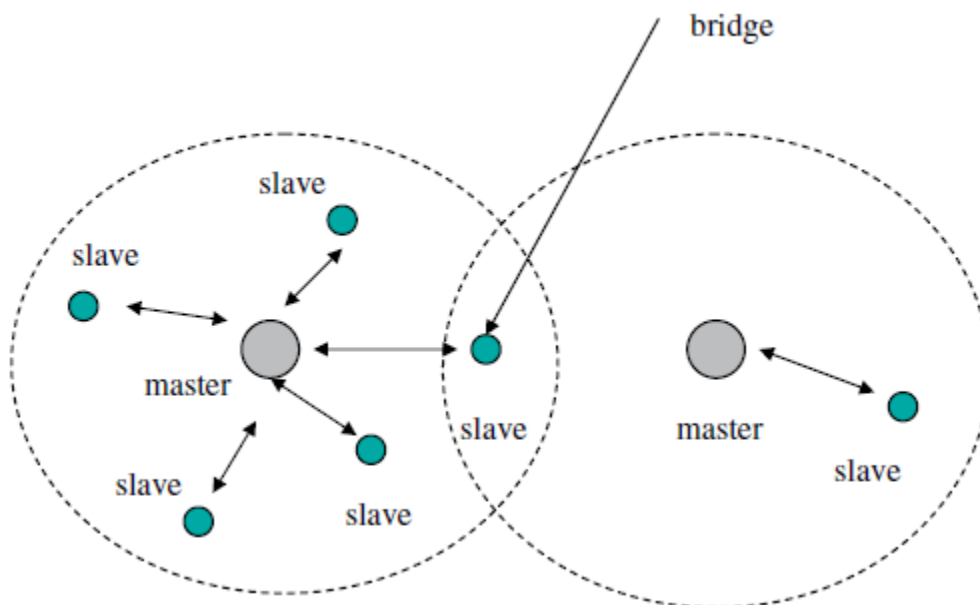


Figura 9 Bluetooth *scatternet* [10].

O *master* da *piconet* é quem coordena a sequência de *hops* e a fase da sequência, através do seu endereço e do seu relógio. Assim que uma *piconet* é formada, a comunicação entre o

master e o *slave* pode ter início. O canal é dividido em intervalos de 625 μ s, chamados *time slots*, onde um *hop* de frequência diferente é usado para cada *slot*. O canal é partilhado entre o *master* e o *slave* usando o *hop* de frequências (espalhamento de frequência) e o *Time-Division Duplex* (TDD) para transmissão bidireccional. O *master* deve começar a transmissão apenas em *time slots* pares e os dispositivos *slaves* em *time slots* ímpares (Figura 10).

No Bluetooth os dados são transmitidos usando pacotes. Um pacote corresponde à justaposição de 1-5 *time slots* consecutivas. Quando um pacote tem o tamanho de uma *time slot*, diz-se que é uma transmissão/recepção *single-slot*, e quando o pacote tem um tamanho superior a uma *time slot* (3 ou 5 *slots*), diz-se que a transmissão é *multi-slot*. As regras da frequência de *hopping* aplicadas aos pacotes ordenam que o início do pacote tem de estar alinhado com o início da *slot*. A frequência de *hopping* permanece fixa durante toda a transmissão do pacote [10].

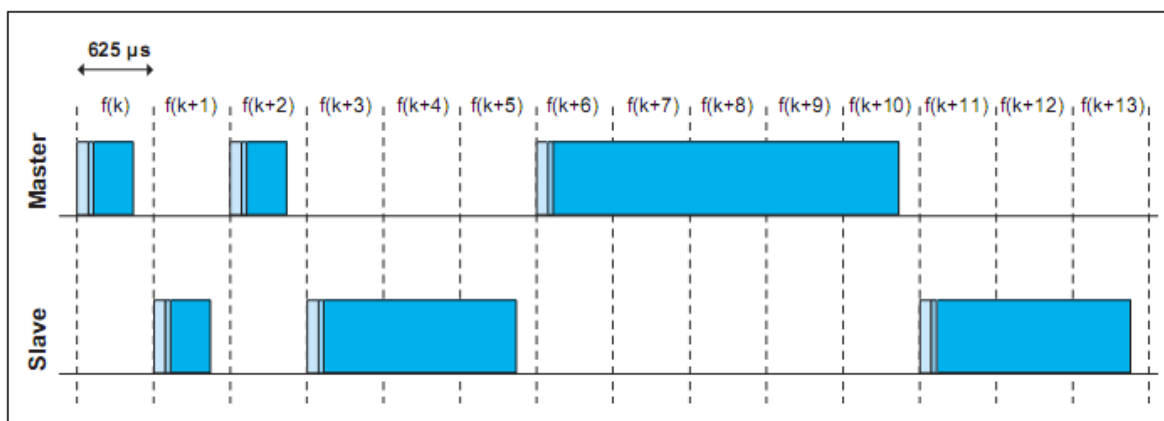


Figura 10 Transmissão *Multi-slot* [17].

São possíveis vários tipos de ligações entre o *master* e o(s) *slave(s)*. Das quais se destacam as seguintes [10][17]:

- *Synchronous Connection-Oriented Link* (SCO) – É uma ligação simétrica do tipo ponto-a-ponto, onde as *time slots* ficam reservadas e a rede funciona como se fosse por comutação de circuito (*circuit-switched*). Este tipo de configuração atinge 64 Kbps, sendo ideal para a comunicação de pacotes de voz. Os pacotes SCO podem ser enviados com redundância para compensar a perda de pacotes, visto que não há reenvio da informação;
- *Extended SCO* (ESCO) – É uma ligação ponto-a-ponto que pode ser simétrica ou assimétrica. Como a SCO, reserva *slots*, e a conexão entre *master* e *slave* pode ser considerada como comutação de circuito. Para além das *slots* reservadas a ESCO

suporta uma janela de retransmissão imediatamente a seguir às *slots* reservadas. A junção entre *slots* reservadas e janela de retransmissão forma a janela completa ESCO;

- *Asynchronous Connection-Less Link* (ACL) – É uma ligação para transmissão de dados. É do tipo ponto-multiponto e garante a retransmissão de pacotes. Este tipo de conexão é análogo à rede de comutação de pacotes e passa a existir quando é feita uma conexão entre um dispositivo *master* e um *slave*.

Existe vários tipos de pacotes (28 tipos) que estão relacionados com os diferentes tipos de ligações. De acordo com a aplicação, pode-se agrupar os pacotes em três grupos:

- *Control packets* (ID, NULL, POLL e FHS) – são usados entre o *master* e os *slaves* para transportar informação relacionada com o rádio (*hopping* de frequência, relógio), com a ligação (estabelecimento, segurança), ou com a conexão (pedidos de conexão);
- *Synchronous packets SCO* (HV1, HV2, HV3, DV, EV3, EV4, EV5, 2-EV3, 2-EV5, 3-EV3 e 3-EV5) – são usados para as conexões orientadas as ligações para transportar voz;
- *Asynchronous packets ACL* (DM1, DH1, DM3, DH3, DM5, DH5, AUX1, 2-DH1, 2-DH3, 2-DH5, 3-DH1, 3-DH3 e 3-DH5) – são usados para conexões ACL para uma melhor eficiência de tráfego de dados.

Estão definidos dois formatos de pacotes: *Basic Rate* (Figura 11) e *Enhanced Data Rate* (Figura 12).

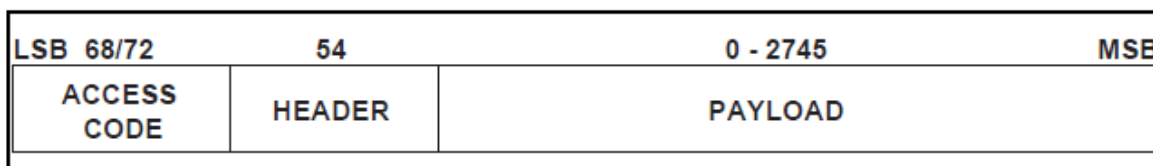


Figura 11 Formato do pacote *Basic Rate* [17].

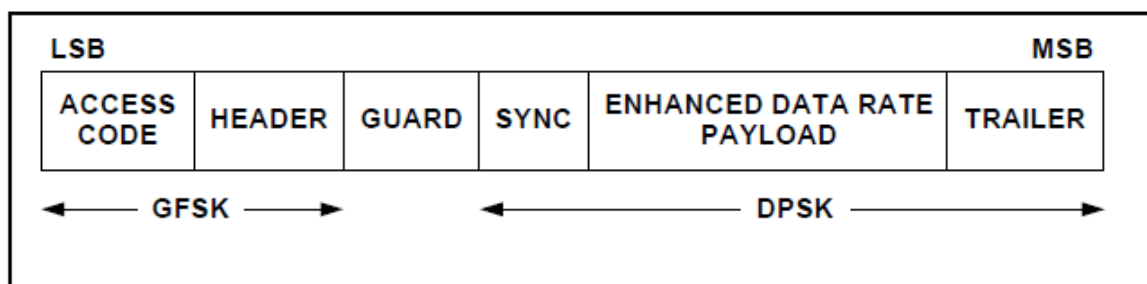


Figura 12 Formato do pacote *Enhanced Data Rate* [17].

Os pacotes *Basic Rate* são constituídos por três campos: código de acesso (68/72 bits), cabeçalho (54 bits) e o *payload* (0 - 2745 bits).

O código de acesso e o cabeçalho dos pacotes *Enhanced Data Rate* são idênticos no formato e modulação aos do *Basic Rate*. A estrutura tem um *guard time* adicional e uma sequência de sincronização. O *guard time* é o período que se inicia no fim do último símbolo GFSK do cabeçalho e termina no início do símbolo de referência da sequência de sincronização, e o seu valor deve estar entre 4,75 μ s e 5,25 μ s. A sincronização consiste num símbolo que tem o comprimento de 11 μ s, e é seguida por dez símbolos DPSK. O *trailer* também é um símbolo, igual a zero [10].

O código de acesso (Figura 13) é usado para sincronização (SYNC WORD), compensação de *offset* (PREAMBLE), e identificação. Há três tipos de código de acesso: *channel access code* (CAC), *device access code* (DAC) e *inquiry access code* (IAC).

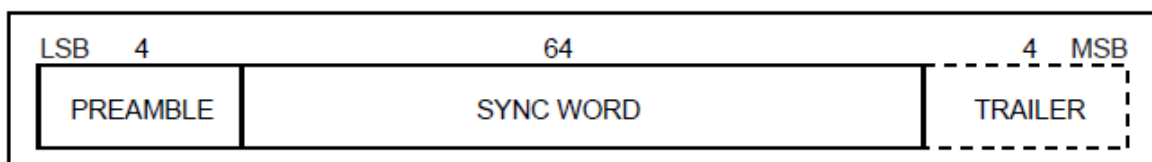


Figura 13 Formato do código de acesso [17].

O cabeçalho (Figura 14) contém informação sobre: o endereço de um dispositivo activo na *piconet* (LT_ADDR), tipo de pacote (TYPE), controlo de fluxo (FLOW), indicação de *acknowledgment* (ARQN), numeração de pacotes para reordenação (SEQN) e verificador da integridade do cabeçalho (HEC).

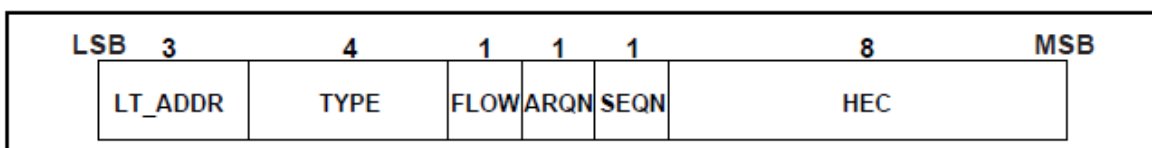


Figura 14 Formato do cabeçalho [17].

Adicionalmente alguns tipos de pacotes inclui uma codificação 1/3 FEC (*Forward Error Correction*) de 36 bits, é um código de repetição de 3 bits usado para proteger o cabeçalho. O código de repetição é implementado repetindo cada bit do cabeçalho 3 vezes.

O *payload* pode conter campos de dados, voz ou ambos. O formato do *payload* depende do tipo de pacote. Pode-se consultar no Anexo A as características dos diversos tipos de pacotes.

De uma forma geral o *payload* dos pacotes assíncronos é constituído pelo cabeçalho, dados, CRC (*Cyclic Redundancy Check*), e em alguns pacotes FEC. O cabeçalho especifica o canal lógico (LLID), controla o fluxo entre os canais (FLOW) e possui um indicador de tamanho do *payload* (LENGTH). Dependendo do tipo de pacote, o cabeçalho possui 1 ou 2 bytes. O número de bytes de dados também é variável de acordo com o pacote. A maioria dos pacotes é protegida por um esquema de retransmissão ARQ (*Automatic Retransmission Query*) baseado no campo CRC. Se algum erro for detectado o receptor indica no campo ARQN do próximo pacote retornado. Alguns pacotes ainda possuem detecção e correcção de erros FEC com um algoritmo de Hamming.

Como já mencionado, os pacotes ID, NULL, POLL e FHS são pacotes de controlo definidos pela especificação. O pacote ID tem tamanho fixo de 68 bits e é usado nas rotinas de *inquiry* e *paging* para fornecer o DAC ou o IAC. O pacote NULL não tem *payload*, tem tamanho fixo de 126 bits e é usado para retornar informações do destino para a origem, como indicar o sucesso de uma transmissão anterior. O pacote POLL é usado pelo dispositivo *master* para procurar por *slaves*, que devem responder mesmo que não tenham informação para transmitir. O FHS é um pacote especial de controlo que dentro de outras coisas contém o endereço Bluetooth (BD_ADDR) e o relógio do transmissor.

Na Figura 15 pode-se observar a máquina de estados Bluetooth, que é usada pelo controlador de ligação. Destaca-se os três estados principais:

- *Standby* – estado por defeito de um dispositivo;
- *Connection* – dispositivo conectado;
- *Park* – dispositivo sincronizado mas não participante.

Adicionalmente, existem mais sete estados provisórios que são usados para estabelecer conexões e permitir a descoberta de dispositivos. Os estados provisórios são:

- *Page* – inicia pedido conexão;
- *Page scan* – recebe pedido de conexão;
- *Inquiry* – procura dispositivos;
- *Inquiry scan* – escuta por processo de *inquiry*;
- *Master response* – resposta do *master*;
- *Slave response* – resposta do *slave*;
- *Inquiry response* – responde a um processo de *inquiry*.

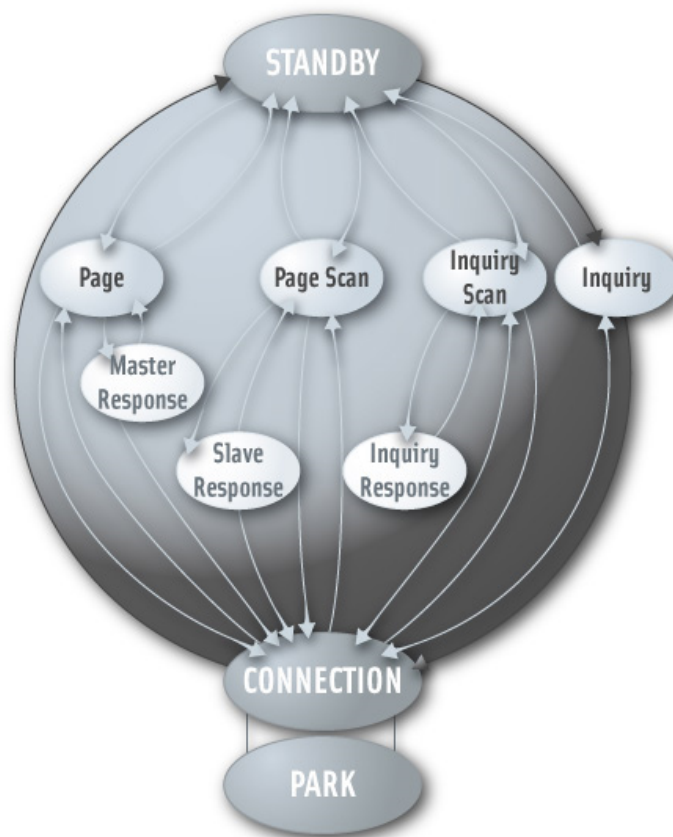


Figura 15 Máquina de estados Bluetooth [16].

O processo de formação de uma ligação Bluetooth consiste em dois processos: *inquiry* e *page*. O objectivo do *inquiry* é fazer com que o *master* encontre os dispositivos vizinhos e que reúna a informação destes nós (endereço e relógio). O objectivo do *page* é usar a informação obtida pelo processo *inquiry* para estabelecer um canal de comunicação.

Durante o processo de *inquiry*, um dispositivo entra no estado de *inquiry* e o outro no estado *inquiry scan*. O nó no estado de *inquiry* alterna repetidamente entre a transmissão de pacotes ID, que contém um IAC e a escuta por respostas. Um dispositivo em *inquiry scan* espera por pacotes ID dos dispositivos no estado de *inquiry* e responde com um pacote FHS (que contém o endereço e relógio). O processo de *inquiry* usa 32 frequências de *hop* dedicadas, de acordo com o procedimento da sequência de *inquiry hopping*. Como vários dispositivos podem receber simultaneamente a mensagens de *inquiry*, pode acontecer que todos respondam ao mesmo tempo. No entanto, como a fase de cada nó é determinada pelo relógio local do dispositivo, é pouco provável que a fase seja a mesma da sequência de *inquiry hopping*. Para evitar que vários dispositivos respondam ao mesmo tempo, cada nó escolhe um intervalo de espera aleatório, entre 0 e 1023 *time slots*.

O processo de *page* é parecido com o de *inquiry*. Um dispositivo no estado de *page* usa a informação obtida durante o *inquiry* e envia uma série de pacotes ID baseados no endereço do dispositivo descoberto. Quando o dispositivo no estado *page scan* responde, o nó no estado de *page* envia um pacote FHS com a informação de sincronização para estabelecer uma conexão *master-slave* e entrar no estado *connection*. O dispositivo no estado de *page* torna-se no *master* e o dispositivo em *page scan* no *slave*.

3.3.3. PROTOCOLO DE GESTÃO DE LIGAÇÃO

O LMP (*Link Manager Protocol*) é responsável pelo controlo e negociação de todos os aspectos relacionados com as conexões entre dois dispositivos. Procedimentos como os de autenticação, encriptação e os modos de operação de baixo consumo de energia são definidos na banda base, mas são configurados através de transacções LMP entre dois dispositivos.

As mensagens LMP são enviadas com as ligações ACL. No entanto, essas mensagens são distinguidas dos dados das ligações ACL e o seu nome termina com ACL-C. A diferença entre ACL-C e ACL-U (que leva dados L2CAP e do utilizador) é detectada pelo campo LLID do cabeçalho do *payload*. Os pacotes ACL-C têm maior prioridade sobre o outro tráfego, mas não é garantido o tempo de entrega nem os pacotes de *acknowledge*.

O protocolo *Link Manager* contém PDUs (*Protocol Data Units*) que permitem mensagens com as seguintes categorias [18]:

- Controlo de conexões;
- Segurança;
- Pedidos informativos;
- Função *switch*;
- Modos de operação;
- Transportes lógicos;
- Modo de teste.

3.3.4. INTERFACE DE CONTROLO DO *HOST*

A HCI (*Host Controller Interface*) fornece uma interface de comandos ao controlador de banda base e ao *link manager*, e acesso aos parâmetros de configuração. Esta interface fornece um método uniforme de aceder as capacidades da banda base.

A pilha protocolar Bluetooth está dividida para que uma parte fosse implementada em *software* (*host*) e a outra em *hardware* (módulo Bluetooth). Contudo, isto não impede que se fabrique dispositivos com a pilha protocolar totalmente implementada em *hardware*. A HCI é constituída por três partes: o *driver* do *host*, o *firmware* do *hardware* e uma camada de transporte entre estes (Figura 16).

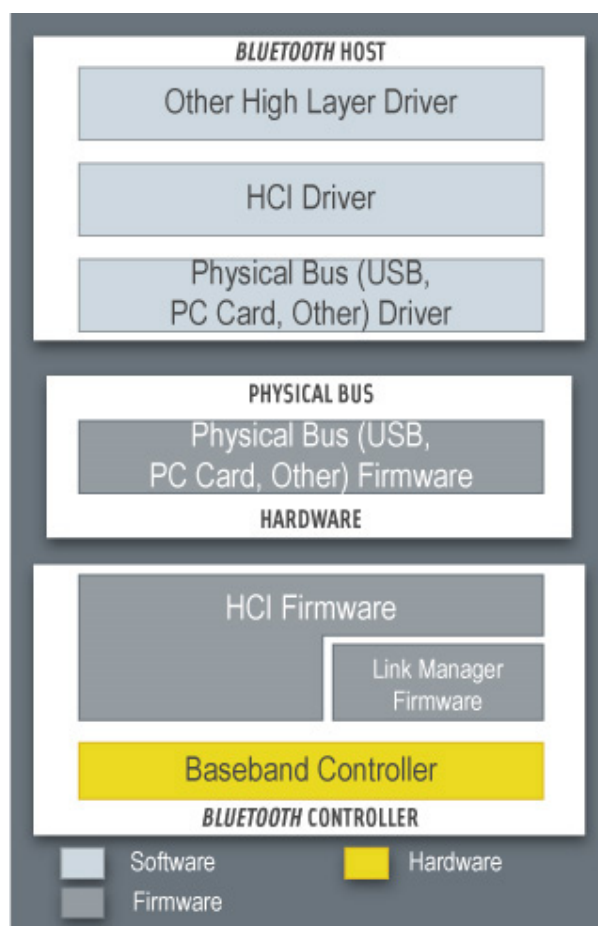


Figura 16 Camadas inferiores da pilha protocolar Bluetooth [19].

3.3.5. CONTROLO LÓGICO DA LIGAÇÃO E PROTOCOLO DE ADAPTAÇÃO

L2CAP (*Logical Link Control and Adaptation Protocol*) suporta a multiplexação de protocolos de camadas superiores, segmentação e remontagem de pacotes e a transmissão de informação da qualidade de serviço (QoS). Permite aos protocolos de nível superior e as aplicações transmitir e receber pacotes de dados da camada superior, até 64 Kbytes de comprimento. Também permite o controlo de fluxo e retransmissão por canal. É definido para ligações assíncronas (ACL) e usa o conceito de canais lógicos (L2CAP *channels*). Cada canal lógico é identificado por um CID (*Channel Identification*). Os canais podem ser sem conexão ou orientados a conexão. Nos orientados a conexão, para cada fluxo

L2CAP é estabelecido um canal entre os dois pontos. Os canais sem conexão restringem o fluxo de dados num sentido único. Pode haver vários canais lógicos entre dois nós, mas todos sobre a mesma ligação ACL (Figura 17).

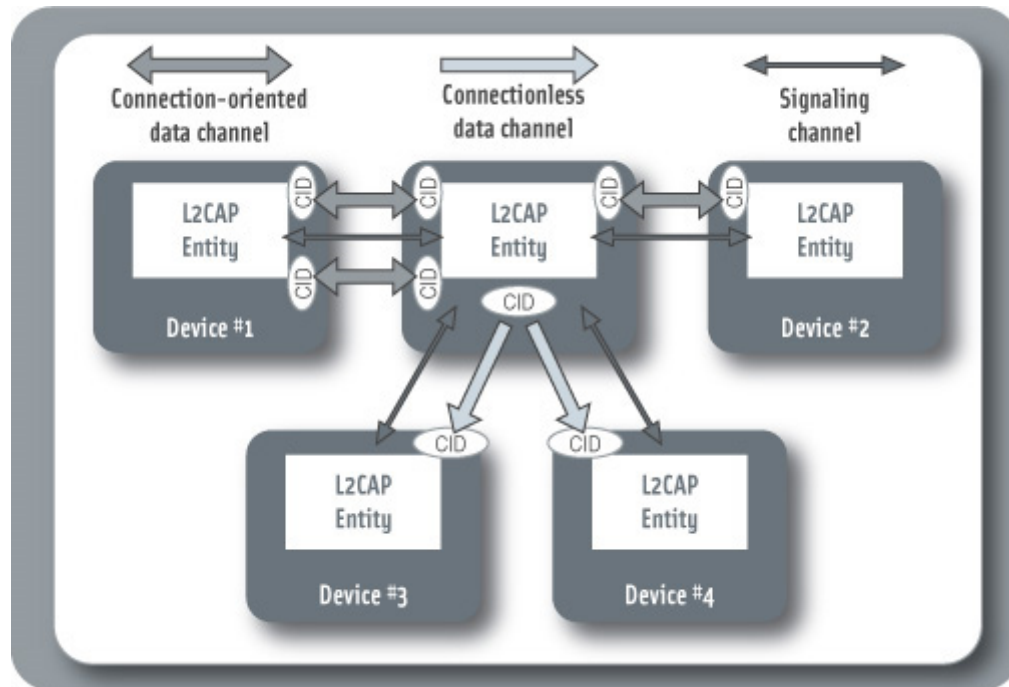


Figura 17 Comunicação entre entidades L2CAP [20].

3.3.6. CAMADAS SUPERIORES

Os principais protocolos que se situam acima da camada L2CAP são: o protocolo de descoberta de serviços (SDP – *Service Discovery Protocol*) e o protocolo de emulação da porta série e USB (RFCOMM).

O SDP é um protocolo essencial para o Bluetooth. É o primeiro e único protocolo que funciona para a descoberta de serviços em ambiente sem fios. Actualmente há novos protocolos em cima do TCP/IP como o JINI e UPnP, mas estes são mais pesados e complicados. Este protocolo é baseado no modelo cliente-servidor. Cada nó é um cliente e um servidor ao mesmo tempo. O SDP suporta:

- Procura de serviços por classe;
- Procura de serviços por atributos;
- Navegação de serviços, que significa ver extensivamente tudo o que é suportado pelo dispositivo.

Na pilha do protocolo do SDP estão definidas sete mensagens para descoberta e restauro de informação do cliente para o servidor. É de notar que o SDP acontece depois da autenticação, visto que é baseado nos procedimentos LMP (*Link Manager Protocol*).

O protocolo RECOMM emula as portas série e USB sobre o protocolo L2CAP. Usa um padrão ETSI (TS 07.10) para esse efeito. Suporta todas as aplicações que façam uso da porta série para comunicar, permitindo ter até 60 portas abertas. O RFCOMM fornece uma fiável transferência de dados, conexões simultâneas e controle de fluxo. A ligação entre o cliente e a aplicação servidor é identificada por um *Data Link Connection Identifier* (DLCI).

O Bluetooth SIG também adoptou alguns protocolos já existentes, como o OBEX (*Object Exchange*), desenvolvido pela IrDA (*Infrared Data Association*) para a troca de objectos. Suporta o transporte de alguns objectos pré-definidos, como o vCard, vCalendar, vMessage e vNote.

Os protocolos WAP e TCP/IP também podem ser usados no Bluetooth, usando PPP (*Point-to-Point Protocol*) sobre a camada RFCOMM.

3.4. PERFIS

Um perfil é a descrição técnica de como implementar uma determinada aplicação. Os perfis definem os procedimentos e protocolos necessários para implementar uma aplicação específica com base nas diferentes camadas da pilha protocolar do Bluetooth.

Os perfis possuem três características padrão:

- Dependência de outros perfis – Todos os perfis dependem do perfil de base, chamado de perfil de acesso genérico (*Generic Access Profile – GAP*), e alguns também dependem de perfis intermediários;
- Formato padrão para interface com usuário – Cada perfil descreve como um usuário deve ver o perfil, fazendo com que seja mantida uma experiência consistente a ele;
- Especificação de partes da pilha protocolar Bluetooth usadas pelo perfil – Cada perfil utiliza opções e parâmetros distintos para cada camada da pilha.

Actualmente existe dezenas de perfis definidos pela Bluetooth SIG. A seguir serão descritos alguns dos perfis mais usados:

- *Generic Access Profile* (GAP) – assegura o bom funcionamento das camadas de ligação. Descreve como é que o dispositivo se deve comportar desde o estado de *standby* até ao de conexão, e garante que as ligações e canais podem ser estabelecidos entre nós. Descoberta, conexão, estabelecimento e segurança são descritos com os parâmetros adequados [10];
- *Service Discovery Application Profile* (SDAP) – este perfil define os protocolos e os procedimentos usados pelas aplicações de descoberta de serviços para procurar serviços noutra equipamento que suporte SDP [10];
- *Serial Port Profile* (SPP) – define como configurar portas série virtuais e conectar dois dispositivos Bluetooth [21];
- *Headset Profile* (HSP) – é um dos perfis mais usados, visto que descreve como um auricular deve comunicar com um dispositivo Bluetooth [10];
- *Generic Object Exchange Profile* (GOEP) – é um perfil útil para trocar objectos entre dois telemóveis. Os objectos são identificados pela extensão e podem ser cartões-de-visita, fotos, vídeos, correio electrónico, etc [10];
- *Synchronization Profile* (SYNC) – é usado em conjunção com o GOEP para sincronizar agendas e endereços (itens de gestão de informação pessoal) entre dispositivos Bluetooth [21].

3.5. **BLUETOOTH *LOW ENERGY***

No dia 17 de Dezembro de 2009, a Bluetooth SIG adoptou a tecnologia Bluetooth *low energy* (Ble), que é a marca característica da versão 4.0 da especificação [27].

Esta tecnologia teve a sua origem em 2001, por investigadores da Nokia, com o nome de Wibree. Em Junho de 2007, a Nokia e a SIG anunciaram que o Wibree ia fazer parte da especificação Bluetooth, como uma versão *ultra low power* (ULP) da tecnologia Bluetooth [28].

O Ble foi desenvolvido para consumir uma fracção de energia do consumo do Bluetooth clássico, de modo a expandir a tecnologia para dispositivos com pouca capacidade de bateria. Foi desenhado e optimizado para aplicações com baixa taxa de transferência de dados. Isto inclui uma grande variedade de aplicações de controlo e sensores, como os sensores para desporto e saúde, controlos remoto, entretenimento doméstico e segurança.

3.5.1. TIPOS DE IMPLEMENTAÇÃO

O Ble permite dois tipos de implementação, *dual-mode* e *single-mode*. A implementação em *single-mode* é aquela que realmente implementa um baixo consumo de energia. Isto porque os chips *single-mode*, permitem o desenvolvimento de dispositivos altamente integrados e compactos. São controladores com uma camada de ligação leve, permitindo um modo *idle* de operação de muito baixa potência, uma descoberta simples de dispositivos, uma transferência de dados ponto-multiponto confiável com uma avançada poupança de energia e conexões seguras encriptadas. A camada de ligação nestes controladores permite a conexão de sensores à Internet para agendar o tráfego entre transmissões Bluetooth. Enquanto, o Bluetooth clássico normalmente proporciona uma vida útil de uma bateria recarregável de dias a semanas, uma implementação em *single-mode* do Ble pode proporcionar uma duração de meses a anos, com uma pilha de relógio.

O *dual-mode* combina o Bluetooth clássico e o *low energy* num único *chip* a um custo reduzido. Além disso, o circuito de rádio é partilhado entre os dois. O *dual-mode* é projectado para permitir uma rápida adopção do *low energy* nas aplicações do Bluetooth clássico, como os telemóveis e os PCs portáteis.

3.5.2. TOPOLOGIA DE REDE

A tecnologia do Ble suporta a topologia de rede em estrela e estrela-barramento, sem limite teórico do número de *slaves* activos. Existe dois casos diferentes para a topologia de rede, topologia em *single* e *dual mode* ou topologia só em *single mode*.

Na topologia em *single* e *dual mode*, os dispositivos de *dual-mode* actuam como *hubs* (elemento central da rede, concentrador) e os dispositivos de *single-mode* actuam como nós. A conexão entre um *hub* e um nó usa a tecnologia Ble, enquanto a conexão *backbone* entre *hubs* diferentes usa a tecnologia do Bluetooth clássico. Um *hub* não precisa de ser necessariamente um dispositivo *dual-mode*, contudo, é necessário um dispositivo *dual-mode* para conectar com dispositivos do Bluetooth clássico. Um exemplo simples desta topologia é um telemóvel equipado com um dispositivo *dual-mode*, que mantém uma conexão *low energy* com um pedómetro e um relógio *single-mode*, e ao mesmo tempo possui uma conexão com um auricular, através do Bluetooth clássico.

Os dispositivos *single-mode* também se podem conectar entre si, sem a presença de um dispositivo *dual-mode*. Neste caso a topologia de suporte é a estrela, onde um dos dispositivos *single-mode* actua como *hub*. Um exemplo desta topologia é uma televisão e o seu controlo remoto com dispositivos *single-mode*, onde o da televisão actua como *hub*.

3.5.3. DIFERENÇAS ENTRE O BLUETOOTH CLÁSSICO E O *LOW ENERGY*

Segundo a Bluetooth SIG, o Ble pode consumir entre 1/2 à 1/100 da potência do Bluetooth clássico, dependendo da aplicação [33]. Esta eficiência é conseguida através da optimização de três áreas básicas do funcionamento: modos conexão e desconexão, o número de pacotes transmitidos durante as conexões, e o tamanho de cada pacote individual [34].

No Bluetooth clássico para que um dispositivo seja conectável ou detectável, o seu receptor tem de estar activo. Portanto, a única maneira de responder a um pedido, é ter o rádio activo durante um período significativo de tempo. O requisito básico para que dois dispositivos de frequência de *hopping* comuniquem, é que, precisam de usar a mesma frequência ou canal ao mesmo tempo (têm de estar sincronizados). No início da comunicação entre dispositivos, eles não estão sincronizados, e precisam de procurar diferentes canais para se encontrarem. No Bluetooth clássico são utilizados 32 canais para sincronização. A procura através de muitos canais requer tempo, e na tecnologia Bluetooth esse tempo pode chegar a alguns segundos, até que dois dispositivos se encontrem, consumindo assim energia. Por sua vez, na tecnologia Ble, só são utilizados três canais para apresentação (*advertising*). Isto permite ao Ble ser consideravelmente mais eficiente do que o Bluetooth clássico.

Há outras duas grandes diferenças entre as duas versões do Bluetooth: o Ble usa poucos canais, e a sequência de *hop* usada pelos rádios é diferente.

As razões para haver poucos canais são: o Ble usa um maior índice de modulação, o que significa que o sinal ocupa uma maior largura de banda, e tem requisitos mais flexíveis para o grau dos filtros do canal. Por causa disso, os canais do Ble estão espaçados em intervalos de 2 MHz, ao invés do 1 MHz do Bluetooth clássico.

Outra melhoria introduzida no Ble, é que quando um dispositivo *slave* não tem dados para transmitir, ele nem sequer necessita de escutar os pacotes de eventos de comunicação

originários do *master*. Isto, permite ao *slave* permanecer no estado de mais baixa potência durante o maior tempo possível, poupando uma quantidade de energia significativa. No entanto, se tiver informação importante para transmitir, então pode acordar no próximo evento de comunicação apropriado e transmitir os dados rapidamente.

Isso permite um excelente compromisso entre o funcionamento em baixa potência e baixa latência de transmissão de dados.

3.5.4. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

As principais características técnicas da tecnologia Bluetooth *low energy* são as seguintes [27]:

- **Transferência de dados** – a tecnologia do Ble suporta pacotes de dados pequenos (mínimo de 8 octetos até ao máximo de 27 octetos) que são transferidos a 1 Mbps. Todas as conexões usam o mecanismo *sniff-subrating* (mecanismo de poupança de energia) para alcançar *duty cycles* muito baixos;
- **Frequency Hopping** – o Ble usa a frequência de *hopping* adaptativa, comum a todas as versões do Bluetooth, para minimizar a interferência com outras tecnologias na banda 2,4 GHz ISM;
- **Controlo do host** – o Ble coloca uma quantidade significativa de inteligência no controlador que permite ao *host* permanecer em modo *sleep* por períodos mais longos de tempo, e ser acordado só pelo controlador quando o *host* precisa de realizar alguma acção. Isto permite uma maior poupança de energia, desde que se assume que o *host* consome mais energia que o controlador;
- **Latência** – pode suportar a configuração de conexões e a transferência de dados em 3 ms, permitindo que uma aplicação possa formar uma conexão e depois transferir os dados em poucos milissegundos;
- **Alcance** – o aumento do índice de modulação proporciona um alcance superior a 100 metros (até um máximo de 200 m [33]).
- **Robustez** – o Ble usa uma forte verificação de redundância cíclica (24 bit CRC) em todos os pacotes, assegurando a máxima robustez contra interferências;
- **Forte segurança** – encriptação AES-128 (*Advanced Encryption Standard*) usando CCM (*Counter with Cipher Block Chaining-Message Authentication Code*) para fornecer uma forte encriptação e autenticação dos pacotes de dados;

- **Topologia** – o Ble usa endereços de acesso de 32 bit em todos os pacotes para cada *slave*, permitindo a conexão de 2^{32} dispositivos. A tecnologia é otimizada para conexões ponto-a-ponto, mas permite conexões ponto-multiponto usando a topologia estrela. Com o uso de conexões e desconexões rápidas, os dados podem mover-se como numa topologia *mesh* (rede em malha) sem a complexidade de manter uma rede *mesh*.

3.6. OUTRAS REDES

Existem varias tecnologias sem fio de pequeno alcance, WPAN (*Wireless Personal Area Network*), que concorrem e/ou complementam o Bluetooth, tais como: ANT [29], ZigBee [31] e UWB (*Ultra-Wideband*) [30].

3.6.1. ANT

O ANT é uma tecnologia proprietária que apresenta uma pilha protocolar de comunicação sem fio, pensada para aplicações de muito baixa potência. Foi desenhado para funcionar com um baixo custo, com microcontroladores de baixa potência e transceptores a operar na banda de 2,4 GHz ISM. O protocolo ANT foi projectado para ser simples e eficiente, de modo a: consumir muito pouca energia, maximizar a vida útil da bateria, utilizar poucos recursos do sistema, simplificar o desenho da rede e o custo da implementação ser baixo.

O ANT também apresenta baixa latência, capacidade de trocar a taxa de transmissão de dados em função do consumo de energia, e suporte para transições de *broadcast*, *bursts* e *acknowledged*, até uma taxa de dados efectiva de 20 kbit/s (a taxa de dados do ANT pelo ar é 1 Mbit/s). O protocolo também dispõe de comunicações bidireccionais que suportam várias frequências e rede de alta densidade. As diferentes topologias que se podem estabelecer são: *peer-to-peer*, estrela, árvore e “praticamente” redes *mesh* (Figura 18) [34].

Os nós ANT são capazes de actuar como *slaves* ou *masters* dentro da rede e trocar de função a qualquer momento. Isto quer dizer que os nós podem actuar como transmissores, receptores ou transceptores para encaminhar tráfego entre nós.

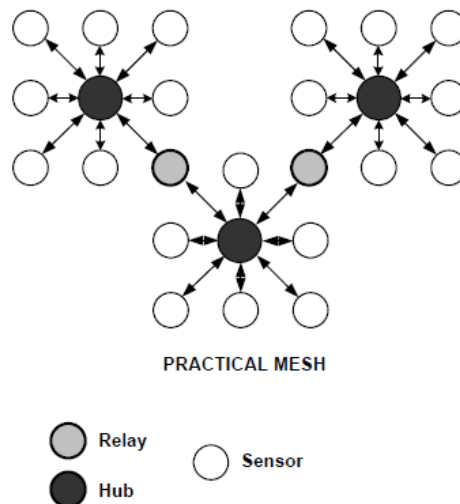


Figura 18 Topologia *practical mesh* do ANT [35].

O ANT permite ao sistema passar a maior parte do tempo no modo *sleep* de muito baixa potência, acordar rapidamente, transmitir num curto espaço de tempo e rapidamente voltar para o modo *sleep*. Isto permite ao ANT ser uma das tecnologias mais eficientes em termos energéticos. Enquanto, o Bluetooth clássico, que é uma tecnologia para transferência rápida de ficheiros entre dispositivos, consome em média 10 vezes mais que o ANT e o custo do *hardware* é 90% superior. No que diz respeito a norma IEEE.802.15.4 (norma que especifica a camada física e o controlo de acesso ao meio, em redes sem fios de baixa taxa de transferência de dados, como o ZigBee) o ANT apresenta uma taxa de dados de 1 Mbit/s e é relativamente menos complexo. No entanto, a interoperabilidade é algo que falta, devido ao facto de ser uma tecnologia proprietária [34].

A maioria das aplicações da tecnologia ANT tem sido no sector do desporto, particularmente no *fitness* e acompanhamento de desempenho no ciclismo. Está presente em equipamentos como as cintas de medição de frequência cardíaca, relógios e equipamentos para medir distância e velocidade. Fabricados por empresa como Adidas, Garmin e Nike.

3.6.2. ZIGBEE

O ZigBee é um padrão que é desenvolvido por um grupo de empresas de diferentes segmentos do mercado, denominada de ZigBee Alliance. A ZigBee Alliance é uma organização cuja missão é definir, monitorizar e controlar produtos fiáveis, de baixo custo e de baixa potência complementando o padrão IEEE 802.15.4. São especificadas pelo

padrão ZigBee as camadas de rede e de aplicação tal como o serviço de segurança entre elas (Figura 19). Enquanto, o padrão IEEE 802.15.4 especifica uma tecnologia de acesso sem fios, cuja sua aplicação principal são as redes pessoais (PAN) e as redes domésticas (HAN), de sensores e dispositivos de controlo alimentados por baterias. O padrão especifica a camada física (PHY – *Physical Layer*) e a sub-camada MAC (*Medium Access Control*) [36].

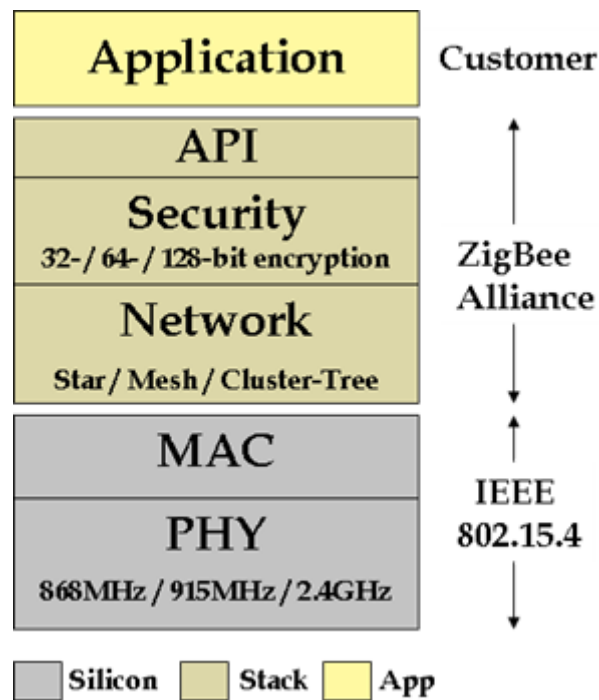


Figura 19 Camadas do padrão ZigBee [36].

Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee operam na banda ISM, não licenciada, nas seguintes frequências [37]:

- 2,4 GHz e débito de 250 KB/s (uso global, modulação O-QPSK);
- 915 MHz e débito de 40 KB/s (América e Austrália, modulação BPSK);
- 868 MHz e débito de 20 KB/s (Europa, modulação BPSK).

O alcance de transmissão pode ir até 70 m em interiores e 400 m no exterior, dependendo directamente da potência do transmissor e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência electromagnéticas, etc.) [38].

Complementando a norma IEEE 802.15.4, no que respeita às restantes camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), o ZigBee tem como principais características o facto de ser um protocolo para aplicações de baixo consumo e de baixo custo. Estas duas

características tornam-no ideal para sistemas de monitorização e sensorização como é o caso dos sistemas de automação doméstica, segurança, controlo de iluminação e de acessos, etc [37].

São especificados dois tipos de equipamentos físicos fornecidos pelos fabricantes [36]:

- FFD (*Full-Function Device*)
 - Funcionam em qualquer topologia;
 - Podem exercer funções de *coordinator* e *router*;
 - Podem comunicar com outro equipamento.
- RFD (*Reduced Function Device*)
 - Limitados à topologia em estrela;
 - Não podem exercer funções de *coordinator* nem *router*;
 - Apenas comunicam com o *coordinator* ou *router*;
 - Baixa complexidade electrónica;
 - Fácil implementação.

Na Figura 20 estão representadas as diferentes topologias de uma rede ZigBee. Podem existir três classes de dispositivos lógicos [36][37]:

- *Coordinator* – Implementável com base em dispositivos do tipo FFD, é responsável pela criação e manutenção da rede, armazenando informação de gestão interna relevante para o seu funcionamento e podendo também funcionar como *bridge* entre diferentes redes ZigBee;
- *Router* – Implementável com base em dispositivos do tipo FFD, além de ser um nó normal também pode funcionar como *router* intermédio, permitindo a comunicação entre nós sem a intervenção do *coordinator*;
- *End-device* – Implementável com base em dispositivos do tipo FFD ou RFD, apenas tem possibilidade de comunicar com a rede não tendo nenhuma função de gestão.

O ZigBee permite no máximo 65535 nós por *coordinator*, e a latência de funcionamento é de 30 ms com a possibilidade de garantir *time slots* para aplicações de baixa latência [37].

O ZigBee é frequentemente comparado com o Bluetooth, no entanto, inicialmente estas duas tecnologias não eram concorrentes. Isto porque o ZigBee foi desenvolvido com o objectivo de realizar monitorização e sensorização de sistemas, enquanto, o Bluetooth é mais apropriado para aplicações que requerem um maior débito de dados, como por

exemplo, as redes Ad-hoc e os sistemas para transmissão de áudio ou de dados ponto-a-ponto. Com o lançamento do Bluetooth *low energy* existe uma maior convergência destas duas tecnologias para aplicações que envolvam dispositivos remotos, alimentados por baterias, nomeadamente sensores e actuadores, com um consumo muito baixo.

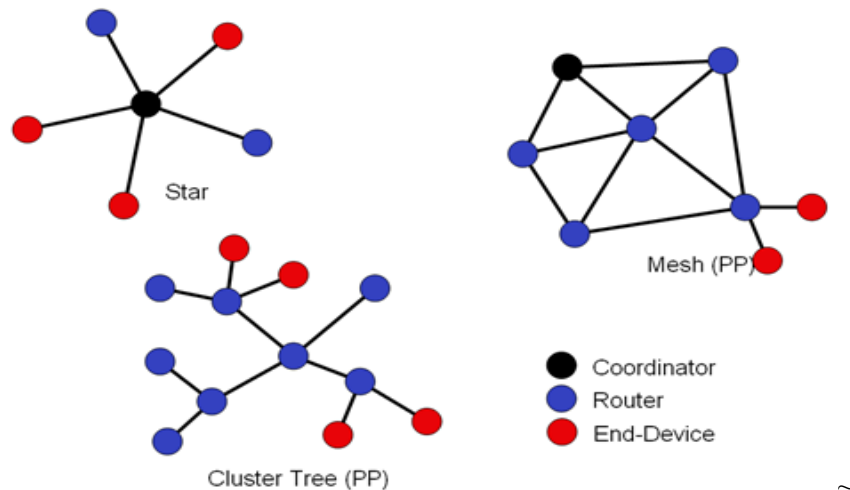


Figura 20 Diferentes topologias de uma rede ZigBee [36].

Contudo, o ZigBee apresenta um grande benefício em relação ao Bluetooth e ao ANT, que é a capacidade de implementação, por completo, de uma rede *mesh*. Sendo que o protocolo estabelece serviços exclusivos para tratar do intercambio de dados dentro da rede *mesh*. Esta formação permite uma comunicação ponto-a-ponto entre os dispositivos para que na ocorrência de uma falha de comunicação com algum elemento dentro de uma rota, um *router* possa estabelecer uma nova rota [39]. Por outro lado uma rede *mesh* complexa é menos eficiente e mais cara de instalar e manter, do que uma rede predeterminada [44].

3.6.3. UWB

Ultra-WideBand (UWB) é uma tecnologia rádio emergente com características bastante atraentes, que tem despertado o interesse por parte de universidades e indústria. A definição mais aceite de um sinal UWB é um sinal com ocupação espectral instantânea superior a 500 MHz ou 20% da frequência central. Uma das técnicas mais promissoras do UWB, especialmente para aplicações de redes de sensores sem fios, é chamada de *Impulse Radio-UWB* (IR-UWB). A técnica IR-UWB consiste numa forma de onda muito curta (nano segundos) que podem ser livres de onda sinusoidal portadora e não requer o processamento da frequência intermediária porque podem operar na banda base. A técnica

IR-UWB foi seleccionada como a camada PHY (física) do grupo de trabalho IEEE 802.15.4a, para a camada PHY da WPAN *Low Rate Alternative*. O princípio da 802.15.4a é baseado em duas camadas PHY consistindo num impulso rádio UWB (operando na banda não licenciado UWB) e noutra opção a operar na banda 2,4 GHz [34].

O UWB foi originalmente desenvolvido para aplicações militares, que requerem comunicações seguras. Com o evoluir da tecnologia, o seu leque de possíveis aplicações tem-se alargado, sendo o ideal para comunicações que necessitam de uma largura de banda muito elevada, de curta distância e com um consumo baixo de energia. O UWB está pensado para:

- Substituir os cabos IEEE 1394 utilizados em câmaras de filmar, câmaras fotográficas digitais, etc;
- Ser a base da ligação Wireless USB;
- Substituição de cabos de vídeo para televisão.

Em Maio de 2005, a Bluetooth SIG também anunciou a sua intenção de trabalhar numa especificação baseada na camada de rádio UWB [40].

No Anexo B estão reunidas as principais características das redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*) acima referidas.

4. MARCHA HUMANA

Em estudos realizados sobre a “análise da marcha humana”, recorre-se a diferentes tipos de sensores para recolher informação cinemática, cinética, energética e mioeléctrica do movimento. São utilizados sensores como: acelerómetros, giroscópios, sensores de pressão, sensores de força, etc.

Para o desenvolvimento de um pedómetro não é necessário recolher tanta informação sobre o movimento, até porque implicava uma maior poder de processamento, consumo de energia e custo de implementação. Normalmente um acelerómetro de 2-eixos é suficiente para desenvolver um pedómetro com boa precisão. No entanto, recorrendo só aos dados fornecidos pelo acelerómetro não é possível discriminar com precisão em que situação é que foi dado o passo, podendo ser a caminhar, correr ou subir/descer escadas, o que leva a uma determinação pouco precisa das calorias consumidas.

No desenvolvimento deste projecto, para além da recolha de dados cinemáticos do movimento (aceleração), também se vai recolher dados sobre a pressão plantar, de modo a fazer uma caracterização estática e dinâmica da distribuição da carga pela superfície de contacto do pé. Isto é, determinar o centro de pressão, picos de pressão, área de contacto e tempo de contacto. Com esta solução pretende-se caracterizar o passo, e logo aumentar a precisão com menor custo e com menor recursos energéticos.

Neste Capítulo é explicada a marcha humana, evidenciando a informação relevante para o desenvolvimento do pedómetro. É analisada as características da pressão plantar durante a marcha, de modo a auxiliar na escolha dos sensores, número de sensores a implementar e local da sua colocação.

4.1. CICLO DA MARCHA HUMANA

O ciclo da marcha é definido como o período que ocorre entre o toque do calcanhar de uma extremidade e o subsequente toque de calcanhar da mesma extremidade. O ciclo da marcha divide-se em duas fases: a de apoio e a oscilante. Na marcha normal, a fase de apoio constitui 60% do ciclo da marcha e é definida como o intervalo em que o pé do membro de referência está em apoio ao solo. A fase oscilante constitui 40% do ciclo da marcha e é quando o membro de referência não contacta o solo [42]. Na Figura 21 pode-se ver a representação do ciclo e na Tabela 7 a descrição das diversas fases do mesmo.

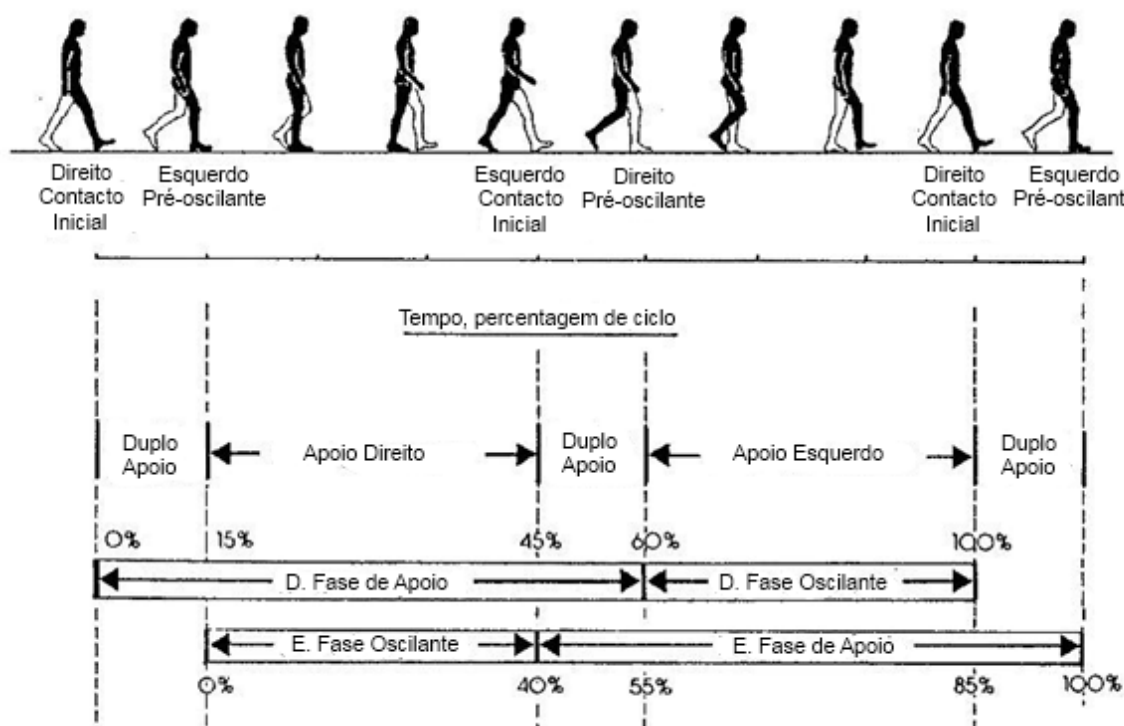


Figura 21 Ciclo da marcha humana (adaptado de [43]).

Tabela 7 Fase de apoio e fase oscilante [42].

Fase de Apoio	
Contacto do calcanhar	Quando o calcanhar contacta o solo
Contacto total do pé, “ <i>flat foot</i> ”	Quando a restante região do pé entra em contacto com o solo
Fase intermédia de apoio	Quando a contra-lateral em balanço passa a fase de apoio
Elevação do calcanhar	O peso é suportado pelo ante pé
Elevação dos dedos do pé	Quando a restante região do pé sai do contacto com o solo
Fase Oscilante	
Fase de aceleração	Início do movimento de elevação da perna
Fase de desaceleração	Fim do movimento da elevação da perna
Fase de balanço médio	Corresponde ao apoio médio, quando os pés estão lado a lado

No ciclo de corrida, a fase de apoio (*Stance*) diminui, a fase oscilante (*Swing*) aumenta, a fase de apoio duplo desaparece e a fase de membros sem suporte ou fase flutuante (*Float*) aparece [53], como ilustra a Figura 22.

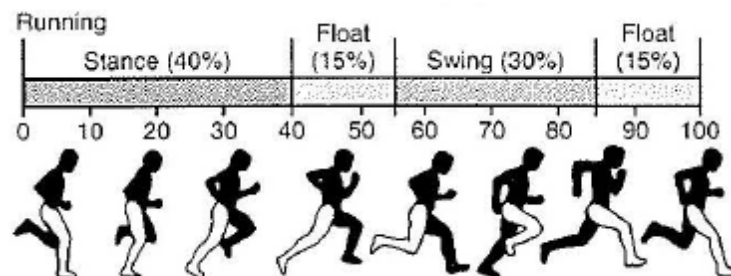


Figura 22 Ciclo da corrida (adaptado de [53]).

4.1.1. PASSO E PASSADA

O comprimento do passo é definido como a distância entre o ponto onde o calcanhar de um membro contacta com o solo, e o ponto em que o calcanhar do membro oposto contacta com o solo. Enquanto, o comprimento da passada é a distância entre o ponto onde o calcanhar de um membro contacta o solo e o ponto em que este mesmo calcanhar volta a tocar o solo. A largura da passada é determinada pela distância entre a linha média de um pé e a linha média do outro, conforme ilustra a Figura 23.

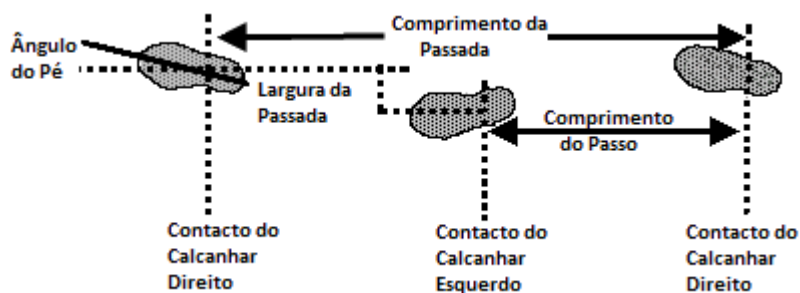


Figura 23 Comprimento do passo e da passada (adaptado de [42]).

4.1.2. PRESSÃO PLANTAR

A trajetória do centro de aplicação da pressão plantar durante o andar passa ligeiramente próxima da linha média do calcanhar e ao longo da borda média do pé. O centro de pressão progride sucessivamente em direcção à cabeça do segundo metatarso (região mediana do pé, anterior ao 2º dedo do pé), progredindo rapidamente ao longo do hálux (dedo grande do pé). Na Figura 24 está demonstrado o progresso do centro de pressão na planta do pé, onde cada ponto corresponde a uma percentagem do ciclo de marcha.

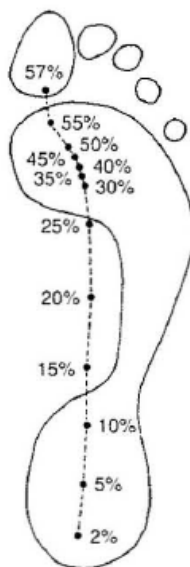


Figura 24 Progresso do centro de pressão na planta do pé [53].

A Figura 25 ilustra a sequência do apoio do pé durante o caminhar, e pode-se observar que após o contacto do calcanhar com o solo a região central do pé tem uma participação quase nula na marcha, isto acontece em cerca de 70% dos indivíduos, seguido de um apoio importante da região frontal do pé, conferindo a fase de propulsão do corpo à frente. Durante o início e o fim do apoio (fase de entrada do calcanhar no solo e fase de

propulsão) as pressões na superfície plantar são muito mais significativas do que na fase de apoio médio [42].



Figura 25 Sequência de apoio durante um passo [42].

A distribuição do peso (em pé e estacionário), expressa como a percentagem da carga total suportada pelo pé, é: superior a 60% do peso na parte de traz do pé, 8% na parte central e 28% na parte da frente do pé. Os dedos têm pouco envolvimento no processo de suporte do peso, tal como demonstra a Figura 26.

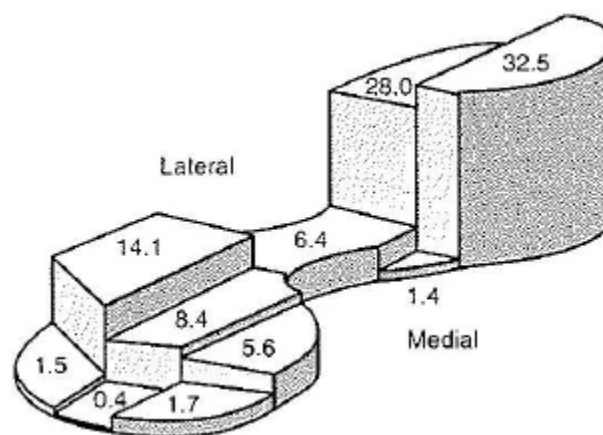


Figura 26 Distribuição do peso pela planta do pé [53].

Na distribuição da pressão plantar durante a corrida, são distinguidos dois tipos de corredores, caracterizados pelo seu primeiro ponto de contacto com o chão: corredores em que o seu primeiro ponto de contacto é a parte traseira do pé (*rearfoot*) e corredores em que é a parte central do pé (*midfoot*). Os corredores *rearfoot* efectuem o contacto inicial com terço posterior do pé e os corredores *midfoot* com terço médio do pé. Nos dois grupos, o primeiro contacto dá-se com a borda lateral do pé. O pico de pressão não difere entre os dois tipos de corredor. O centro de pressão difere de 20% até 40% do pé nos dois grupos de contacto, na maioria do tempo de contacto, indicando que a maior parte do tempo é despendida na parte frontal do pé [53].

4.1.3. SUBIR E DESCER ESCADAS

Durante a subida e descida de escadas, o centro de pressão concentra-se sobretudo na parte frontal do pé, sendo a pressão no calcanhar pouca ou nenhuma. Na Figura 27 pode-se observar o ponto de contacto normal, aquando a subida de escadas por um adulto, a uma velocidade normal.

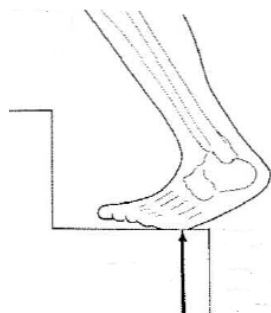


Figura 27 Centro de pressão na subida de escadas [53].

4.2. COLOCAÇÃO DOS SENSORES

Após o estudo teórico sobre a marcha humana, verifica-se que são possíveis várias configurações para colocação dos sensores de pressão. Contudo, para efeitos de uso num pedómetro, a informação cedida pelos sensores de pressão com maior relevância é no momento de contacto do pé com o solo. Tendo isso em consideração, há uma configuração que se evidencia, que é a colocação de um sensor na primeira zona de contacto com o solo e que sofre a maior pressão (o calcanhar), tal como demonstra a Figura 28.



Figura 28 Primeira configuração dos sensores de pressão (adaptado de [54]).

Outra configuração que se poderá verificar ser útil é a colocação de mais um sensor perto da última zona onde pé deixa de estar em contacto com o solo (Figura 29).



Figura 29 Segunda configuração dos sensores de pressão (adaptado de [54]).

A distribuição e o número de sensores a usar, será alvo de estudo na fase de testes do protótipo, podendo diferir das apresentadas. A configuração dependerá do tipo de sensores usados, bem como da quantidade de informação que se verificar ser necessário recolher.

4.3. CÁLCULO DE PARÂMETROS

Depois de determinada a ocorrência de passos, é possível calcular os vários parâmetros relativos ao exercício da pessoa. Os parâmetros mais relevantes para apresentar no pedómetro são: número de passos, distância percorrida, velocidade do atleta, tempo do exercício e calorias consumidas.

4.3.1. DISTÂNCIA PERCORRIDA

Um dos parâmetros mais relevantes é a distância percorrida, que pode ser obtida através de:

$$\text{Distância} = \text{número de passos} \times \text{distância por passo} \quad (1)$$

Segundo vários estudos, a distância por passo (passada) depende da velocidade e da altura do atleta. O comprimento do passo será longo se o atleta for alto ou correr a elevada velocidade. No estudo realizado por Atwater, em vinte e três velocistas de 100 m (9,9 até 10,4 segundos), conclui que o comprimento médio do passo é de 1,35 vezes a altura do atleta [68].

Neste projecto serão utilizados como referência, para determinação do comprimento do passo, os dados experimentais de Neil Zhao (Tabela 8). Os valores da passada são

apresentados em função do número de passos realizados em intervalos de dois segundos e em função da altura do atleta.

Tabela 8 Relação entre a velocidade da passada e a altura do atleta [67].

Número de passos em 2 s	Passada (m/s)
1	Altura / 5
2	Altura / 4
3	Altura / 3
4	Altura / 2
5	Altura / 1,2
6 ou 7	Altura
≥ 8	1,2 x Altura

4.3.2. VELOCIDADE DO ATLETA

A velocidade do atleta é igual a distância percorrida sobre o tempo que a demorou a percorrer. Então, a velocidade em função do número de passos em dois segundos pode ser obtida através de:

$$Velocidade (m/s) = \frac{(N^{\circ} \text{ Passos (em 2 s)} \times \text{Passada})}{2 \text{ s}} \quad (2)$$

4.3.3. CALORIAS CONSUMIDAS

Não existe um método exacto para calcular as calorias consumidas durante um exercício. Alguns dos factores que o determinam são: peso corporal, intensidade do exercício, tipo de exercício, metabolismo do atleta e o nível condicionamento (temperatura, humidade, etc.).

Para o cálculo das calorias consumidas vai-se usar uma fórmula desenvolvida por fisiologistas, que padronizaram a intensidade das actividades físicas. A fórmula é baseada no Equivalente Metabólico (MET) das actividades. Que representa a quantidade de energia que uma actividade consome, como um múltiplo da taxa metabólica de repouso (RMR) do individuo. Um MET (1 kcal/kg/hora) é o equivalente a energia despendida em repouso. Assim, pode-se estimar o consumo de energia durante uma actividade física através de [69]:

$$Calorias (kcal) = METs \times Peso(kg) \times Duração(horas) \quad (3)$$

O valor dos METs, das várias actividades de interesse para o pedómetro, pode ser consultado na Tabela 9.

Tabela 9 Estimativa dos equivalentes metabólicos para várias actividades [69].

Actividade física	METs
Parado em repouso, deitado, sentado	1
Caminhar < 2 mph (<3,22 km/h), superfície firme e plana	2
Caminhar 2 mph (3,22 km/h), superfície firme e plana	2,5
Caminhar 2,5 mph (4,02 km/h), superfície firme e plana	3
Caminhar 3 mph (4,83 km/h), superfície firme e plana	3,3
Caminhar 3,5 mph (5,63 km/h), superfície firme e plana	3,8
Caminhar 4 mph (6,44 km/h), superfície firme e plana	5
Caminhar 4,5 mph (7,24 km/h), superfície firme e plana	6,3
Correr 5 mph (8,05 km/h), superfície firme e plana	8
Correr 6 mph (9,66 km/h), superfície firme e plana	10
Correr 7 mph (11,27 km/h), superfície firme e plana	11,5
Correr 8 mph (12,87 km/h), superfície firme e plana	13,5
Correr 9 mph (14,48 km/h), superfície firme e plana	15
Correr 10 mph (16,09 km/h), superfície firme e plana	16
Subir escadas a correr	15

Para velocidades do caminhar entre 3 e 5 km/h verifica-se uma relação linear com o consumo de oxigénio (1 MET é igual a um consumo de oxigénio de 3,5 ml/kg/min). No entanto, para velocidades mais rápidas o consumo de oxigénio sobe, tornando o caminhar menos económico, tal como demonstra a Figura 30.

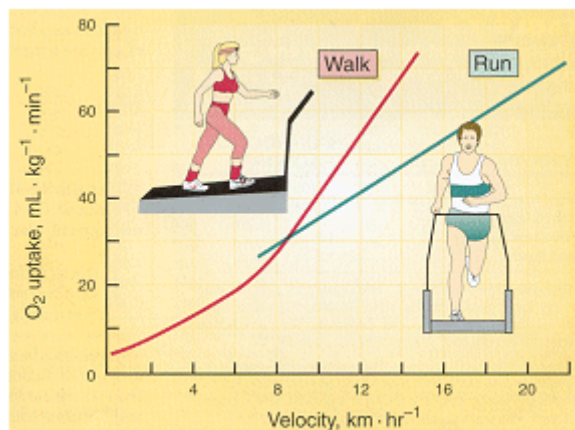


Figura 30 Relação entre a velocidade e o consumo de oxigénio [68].

Analisando o gráfico da Figura 30, verifica-se que do ponto de vista energético é mais económico passar de caminhar para correr quando a velocidade excede os 8 km/h. Acima dos 8 km/h o consumo de oxigénio para um caminhante excede o consumo de oxigénio de um corredor. A 10 km/h o consumo do oxigénio do caminhante é 40 ml/kg/min, comparado com os 35 ml/kg/min do corredor.

Tendo em conta a relação entre a velocidade e o consumo energético, optou-se por linearizar a obtenção do valor MET em três trechos (linearização da Tabela 9). Isto é, para valores da velocidade no intervalo $[0; 5,63[$ km/h, o valor do MET é obtido através de:

$$MET = 0,4753 \times \text{Velocidade (km/h)} + 1,0703 \quad (4)$$

Para valores da velocidade no intervalo $[5,63; 8,05[$ km/h, o valor do MET é:

$$MET = 1,7246 \times \text{Velocidade (km/h)} - 6,0216 \quad (5)$$

Para valores da velocidade no intervalo $[8,05; +\infty[$ km/h, o valor do MET é:

$$MET = 1,0131 \times \text{Velocidade (km/h)} - 0,105 \quad (6)$$

A utilização deste método para estimar a energia despendida por um indivíduo, durante a actividade física, pode não ser muito preciso. Isto porque, a estimativa é feita com base em resultados experimentais que generalizam a população. Para um dado indivíduo a energia despendida pode variar da apresentada, visto que, este método não tem em conta as diferenças da massa corporal, adiposidade, idade, sexo, eficiência do movimento, condições ambientais e geográficas no local da actividade.

5. HARDWARE

A escolha do *hardware*, necessário para a realização do projecto, é uma decisão fundamental para que o sistema cumpra todos os objectivos delineados de forma eficaz e eficiente. Neste Capítulo é feita a análise de algumas soluções de mercado, no que diz respeito a: unidade de processamento, módulo Bluetooth, sensores e fonte de alimentação. Na Figura 31 está representada a interligação dos principais órgãos do sistema.

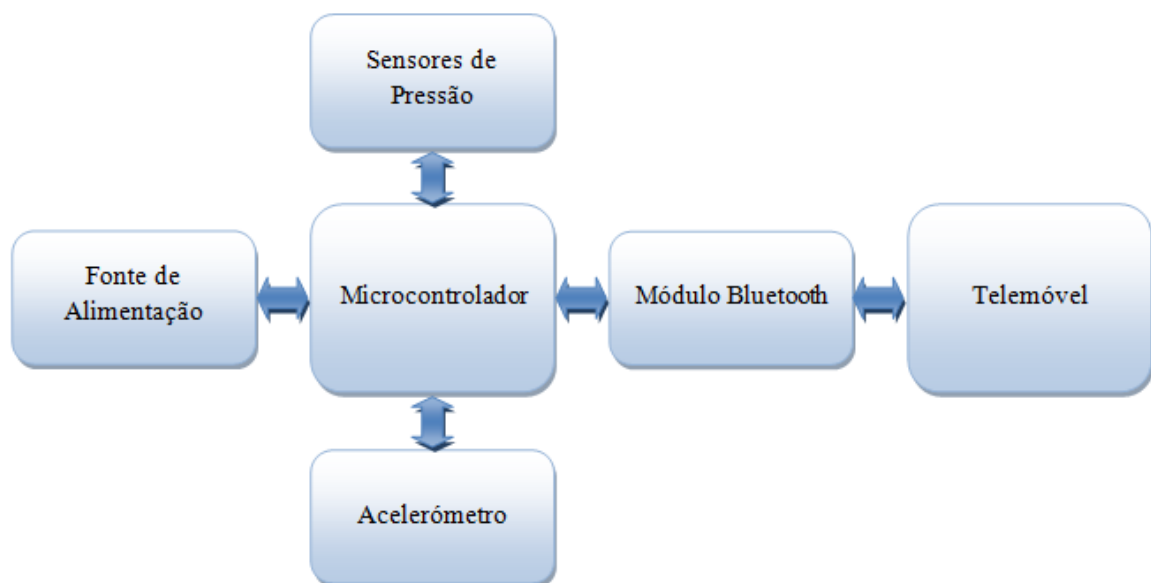


Figura 31 Interligação dos principais órgãos do sistema.

5.1. UNIDADE DE PROCESSAMENTO

A unidade de processamento necessária ao sistema tem os seguintes requisitos principais:

- Uma porta de comunicação série síncrona – I2C (*Inter-Integrated Circuit*) ou SPI (*Serial Peripheral Interface*);
- Um conversor analógico-digital (A/D), com pelo menos dois canais;
- Uma USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*);
- Baixo consumo de energia.

A escolha na unidade de processamento recaiu essencialmente sobre os microcontroladores da família PIC (*Programmable Interface Controller*), da empresa Microchip Technology Inc. Esta decisão foi relativamente fácil de tomar, tendo em conta: a disponibilidade do equipamento para a sua programação, o conhecimento prévio do seu funcionamento e a disponibilidade de alguns modelos.

Numa fase inicial foi utilizado o modelo PIC18F2550 para desenvolver a comunicação com o acelerómetro. Este modelo para além de preencher todos os requisitos necessários, também permite efectuar a sua programação utilizando o seu módulo USB, sendo para tal necessário pré carregar um *bootloader*.

Numa fase mais avançada do desenvolvimento do sistema, decidiu-se requisitar à Microchip amostras de um modelo mais recente, o PIC18F25J50. A principal diferença entre os dois modelos é a introdução da tecnologia nanoWatt XLP™ eXtreme Low Power no PIC18F25J50. Esta tecnologia tem como principais vantagens [55]:

- Correntes em modo *sleep* até 20 nA;
- Correntes em modo activo até 50 μ A/MHZ;
- Correntes *de Brown-out Reset* até 50 nA, protege aquando baterias descarregadas ou trocadas;
- *Real-time Clock* até 500 nA, e correntes de *Watchdog Timer* até 400 nA.

Com esta troca pretendia-se maximizar a duração da bateria, utilizando um microcontrolador projectado para o efeito e tornar o sistema mais modular, recorrendo ao seu maior número de periféricos.

Na Tabela 10 pode-se verificar as principais características da PIC18F2550 e da PIC18F25J50.

Tabela 10 Principais características da PIC18F2550 e da PIC18F25J50 [56][57].

Característica	PIC18F2550	PIC18F25J50
Arquitectura	8-bits RISC	8-bits RISC
Número de pinos	28	28
Tensão típica de alimentação	5V	3,3V
Corrente típica em modo <i>sleep</i>	2,0 μ A	3,2 μ A
Corrente típica em modo <i>deep sleep</i>	-	33 nA
Corrente típica em modo activo (4 MHz e +25°C)	2,5 mA	1,6 mA
Corrente típica em modo <i>idle</i>	1,1 mA	0,728 mA
Módulos USART	1	2
Módulo <i>Master Synchronous Serial Port</i> (MSSP)	1	2
Conversor A/D	10-bits até 13 canais	10-bits até 13 canais
Módulo USB	Sim	Sim
Relógio de tempo real e calendário (RTCC)	Não	Sim
Regulador de tensão interno de 2,5V	Não	Sim
“Remapeamento” de pinos	Não	Sim

5.2. MÓDULO BLUETOOTH

Para transmitir os dados do sistema para um telemóvel, é necessário um módulo Bluetooth. Esse módulo deve ter: uma dimensão reduzida, um consumo de energia relativamente baixo e o seu *firmware* tem de suportar o perfil de emulação da porta série (SPP). Com estas características, existem várias alternativas no mercado, das quais se destaca as apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 Diferenças entre módulos Bluetooth [58][59][60].

	National Semicondutor LMX9838	ST SPBT2532C2.AT	Bluegiga Technologies WT12
Norma Bluetooth	V2.0	V2.1 + EDR	V2.1 + EDR
Classe	2	2	2
Alcance	10 m	10 m	40 m
VCC	3,3V	3,3V	3,3V
Consumo de Corrente	- Máximo numa transmissão contínua: 65 mA - <i>Sniff mode</i> : 5,6 mA - <i>Idle mode</i> : 100 μ A	- Média numa transmissão ACL: 41 mA - <i>Sniff mode</i> : 4,2 mA - <i>Idle mode</i> com <i>deep sleep</i> : 3,1 mA	- <i>Link</i> Activo: 60 mA - <i>Link</i> activo em <i>sniff mode</i> : 2.5mA - <i>Link</i> activo em <i>park mode</i> : 2.5mA - <i>Idle mode</i> com <i>deep sleep</i> : <1mA
Interfaces	UART, 3xGPIO	UART, I ² C, SPI, I ² S, 4xGPIO	UART, USB, SPI, 6xGPIO
Protocolos	L2CAP, RFCOMM, SDP	L2CAP, RFCOMM, SDP	L2CAP, RFCOMM, SDP
Perfis	GAP, SDAP, SPP	GAP, SDAP, SPP	SPP, DUN, HFP, HSP, HID, AVRCP, DI, PBAP, OPP, FTP, HDP
Inclui Antena	Sim	Não	Sim
Dimensão	10 x 17 x 1.85 mm	10 x 13 mm	26 x 14 x 2,4 mm

5.2.1. MÓDULO BLUETOOTH LMX9838

O módulo escolhido para ser incluído no sistema foi o LMX9838, da empresa National Semicondutor. Este módulo não é o mais recente, nem o que apresenta no global as melhores características. No entanto, é um módulo que cumpre todos os requisitos, apresenta as vantagens: de ser totalmente integrado num encapsulamento SMD (Figura 32), de incluir a antena, e do suporte documental por parte do fabricante ser bastante bom.

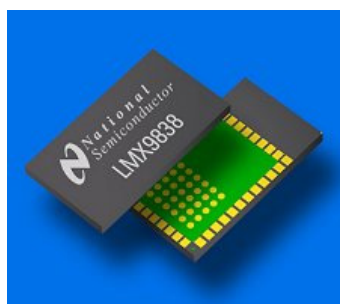


Figura 32 Módulo Bluetooth LMX9838 [61].

Na Figura 33 pode-se observar o diagrama de blocos do LMX9838. É de destacar a interface UART, que permite a um PC ou microcontrolador controlar o módulo e enviar dados (até 921,6 kbit/s). O processador de 16-bits Compact RISC que lida com os requisitos de processamento dos dados e da gestão das ligações. O transceptor RF com a antena e a pilha Bluetooth, necessários a comunicação, estão integrados no chip. O suporte do modo de baixa potência através do uso de um oscilador de 32,768 KHz.

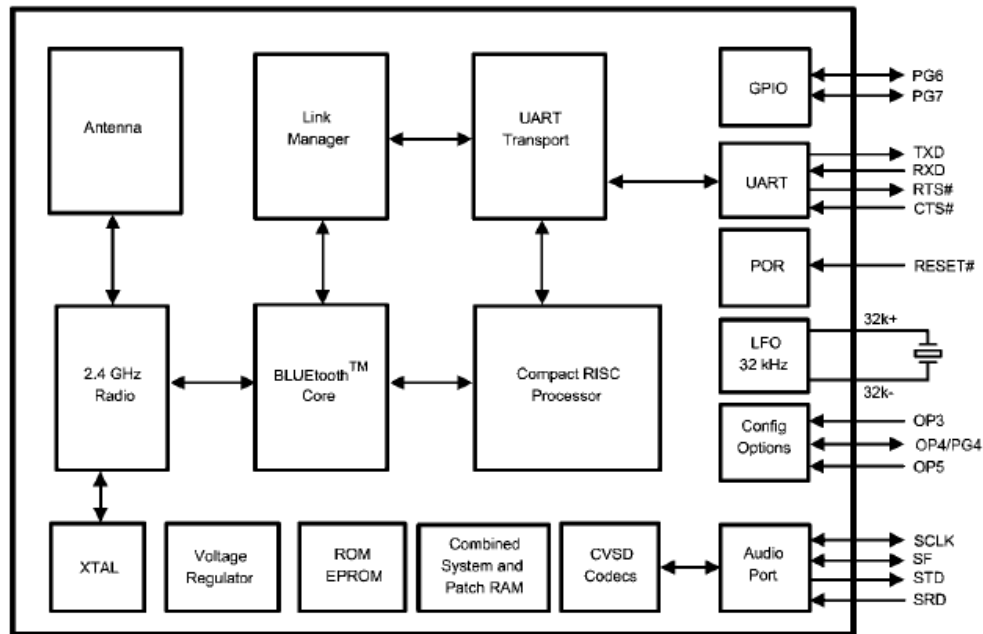


Figura 33 Diagrama de blocos do LMX9838 [58].

No que concerne ao *firmware* (Figura 34), o LMX9838 inclui a pilha Bluetooth (v2.0) completa com as seguintes camadas protocolares:

- *Link Controller*;
- *Link Manager*;
- *L2CAP (Logic Link Control and Adaptation)*;
- *RFCOMM*;
- *SDP (Service Discovery Protocol)*.

A aplicação integrada no chip, em conjunto com as camadas protocolares, oferece os seguintes perfis:

- *GAP (Generic Application Profile)*;
- *SDAP (Service Discovery Application Profile)*;
- *SPP (Serial Port Profile)*.

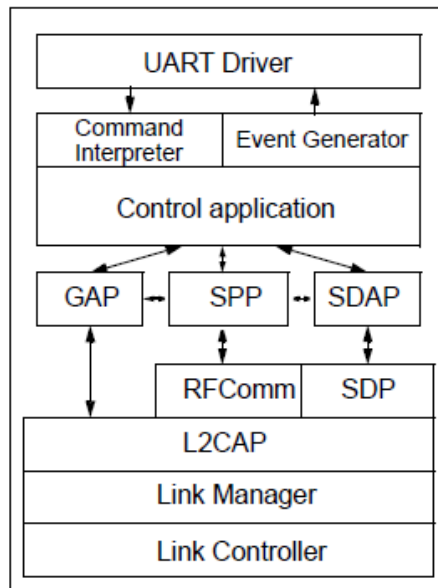


Figura 34 Implementação do *firmware* do LMX9838 [62].

A aplicação de controlo faz a gestão de todas as interações dos perfis com a pilha, mas também oferece uma interface de comandos simplificada sobre a UART. A interface é usada para configurar o dispositivo, estabelecer ligações e receber eventos do módulo. A interface pode lidar com qualquer pacote de transmissão de dados para fornecer suporte multiponto ou manipular dados RAW (não processados), através da colocação da UART em modo transparente.

O *firmware* também pode aceitar ou estabelecer ligações síncronas (SCO) para transmitir dados de áudio. Assim que a ligação for estabelecida o *firmware* encaminha os dados síncronos para a interface PCM, utilizando as definições predefinidas do controlador e sem mais nenhuma intervenção do *host*.

Este *firmware* possui gestão de ligações ponto-a-ponto e ponto-multiponto, suportando taxas de dados até o máximo teórico sobre RFCOMM de 704 kbps. A memória interna suporta até sete ligações activas de dados e uma ligação activa SCO.

5.2.2. MODOS DE OPERAÇÃO DO MÓDULO LMX9838.

A operação do LMX9838 pode ser dividida em dois modos, “modo de inicialização” e “modo bluetooth”. Após a inicialização ou *reset*, o LMX9838 inicia no “modo de inicialização”, que verifica parâmetros de operação necessários. O conteúdo da EEPROM interna é copiado para a RAM, e em seguida, uma vez que todos os parâmetros necessários foram verificados, o dispositivo entrará em “modo bluetooth”.

O “modo bluetooth” pode ser dividido em diferentes estados. Cada estado representa situações especiais que descrevem o comportamento do módulo. Os estados de operação são influenciados por algumas características, armazenadas no NVS (*Non-Volatile Storage*). Dependendo dessas configurações, o dispositivo entrará em modos diferentes e agirá de acordo com elas.

Dos estados de operação, é essencial referir que o LMX9838 por defeito, depois da inicialização ou reset, encontra-se em modo de espera (“*Idle Automatic*”). Isto significa que aguarda por pedidos e automaticamente responde a pedidos de conexão. Se for conectado por um dispositivo remoto, o LMX9838 estabelece automaticamente uma ligação SPP e indica o estabelecimento da ligação ao *host*, através do evento “*Link Established Event*” e através da colocação do pino PG6 a “1”. Por defeito, o módulo de seguida entrará no estado “*Transparent Slave*”. Para mais informação sobre os estados de operação é recomendada a leitura do ponto “3.2 BLUETOOTH MODE” do “*LMX9838 Software Users Guide*” [62].

5.2.3. MODOS DE OPERAÇÃO DA UART

A principal interface de comunicação entre o microcontrolador e o LMX9838 é a interface UART. A UART possui os seguintes modos de operação:

- Modo de comando (“*Command Mode*”) – O LMX9838 oferece uma grande variedade de comandos para configurar o *hardware* e o funcionamento do Bluetooth. No modo de comando, o LMX9838 tenta interpretar todos os dados enviados através da UART para um comando conhecido. Os comandos devem ser enviados num formato de pacote específico. A Interface é baseada num mecanismo de eventos. Qualquer comando enviado será confirmado pelo evento de confirmação apropriado. Eventos inesperados (por exemplo, pedidos de ligação) serão relatados por eventos de indicação.
- Modo transparente (“*Transparent Mode*”) – No caso de o LMX9838 ter estabelecido uma ligação a um único dispositivo remoto e não ser necessário enviar comandos de configuração, a interface UART pode ser comutada para o modo transparente. Isto significa que os dados são encaminhados directamente para a ligação Bluetooth e não são interpretados. Também os dados recebidos não são indicados como eventos, eles são enviados como dados RAW para a UART.

5.2.4. INTERFACE DE COMANDO

O LMX9838 pode ser controlado com comandos simples na interface UART. Os comandos devem ser enviados dentro de um formato de pacote específico (Figura 35).

Start Delimiter	Packet Type ID	Opcode	Data Length	Check sum	Packet Data	End Delimiter
1 Byte	1 Byte	1 Byte	2 Bytes	1 Byte	<Data Length> Bytes	1 Byte
-----Checksum-----						

Figura 35 Fragmentação do pacote de comando [62].

Todos pacotes enviados têm de ser construídos com os seguintes elementos:

- “*Start Delimiter*” (código: 0x02) – indica o início de um novo pacote;
- “*Packet Type Identification*” – indica o tipo de pacote. São validos os seguintes tipos de pacote:
 - “*Request*” (REQ, código: 0x52) – pedido enviado ao módulo Bluetooth. Todos os pacotes são respondidos com um “*confirm*”;
 - “*Confirm*” (CFM, código: 0x43) – confirmação do módulo Bluetooth a um pedido;
 - “*Indication*” (IND, código: 0x69) – informação enviada pelo módulo, não é uma confirmação directa a um pedido;
 - “*Response*” (RES, código: 0x72) – uma resposta opcional a uma “*Indication*”.
- “*Opcode*” – especificador de um comando. Cada comando é representado por um identificador de um byte. Dentro das dezenas de comandos disponíveis destacam-se os seguintes:
 - “*GAP_Inquiry*” (0x00) – Procura por dispositivos;
 - “*SDAP_Connect*” (0x32) – Estabelece uma ligação SDAP;
 - “*SDAP_Disconnect*” (0x33) – Fecha uma ligação SDAP;
 - “*SDAP_Service_Browse*” (0x35) – Procura informação sobre um serviço;
 - “*SPP_Establish_Link*” (0x0A) – Estabelece uma ligação SPP;
 - “*SPP_Send_Data*” (0x0F) – Envia através de uma ligação SPP.
 - “*SPP_Transparent_Mode*” (0x11) – Transita a ligação SPP para modo transparente.
- “*Data Length*” – número de bytes na área “*Packet Data*”. O tamanho máximo é 333 bytes;

- “Checksum” – é uma soma de verificação BCC (*Block Check Character*) dos bytes contidos no “Packet Type”, no “Opcode” e no “Data Length”. A soma de verificação é calculada como o byte menos significativo da soma de todos os bytes;
- “Packet Data” – os campos de dados contém os dados binários;
- “End Delimiter” – indica o fim do pacote.

5.2.5. CRIAR UMA CONEXÃO SPP

Para transmitir os dados do sistema para o telemóvel, é necessário estabelecer uma ligação SPP. O estabelecimento da ligação SPP, deve respeitar os seguintes procedimentos:

“Inquiry”

Inicialmente é necessário procurar o dispositivo na área de alcance, ao qual se pretende estabelecer a ligação. Para tal, efectua-se o procedimento de “Inquiry” (Figura 36).

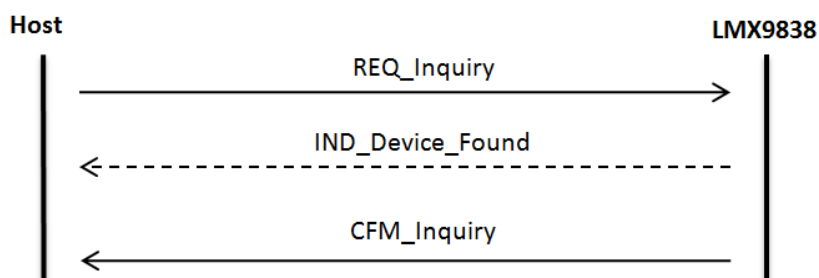


Figura 36 Procedimento de “Inquiry” [62].

Se for encontrado um dispositivo, este responde com o seu endereço Bluetooth e a sua classe. Sendo também necessário esperar pela confirmação do pedido.

“SDAP service browse”

Para estabelecer uma ligação com outro dispositivo, é necessário o seu endereço Bluetooth (BD_Addr), mas também o número da porta RFCOMM. Se a porta “Com” for desconhecida, pode ser requisitada através de um pedido de descoberta de serviços, usando o cliente SDAP. Um pedido SDAP só pode ser efectuado através de uma ligação SDAP. Para obter informação sobre um serviço remoto, o *host* tanto pode usar: “Service Browse”, “Service Search”, “Service Request” ou “Attribute Request”. Normalmente o “Service Browse” é suficiente. Na Figura 37 pode-se ver o procedimento para efectuar um “Service Browse”.

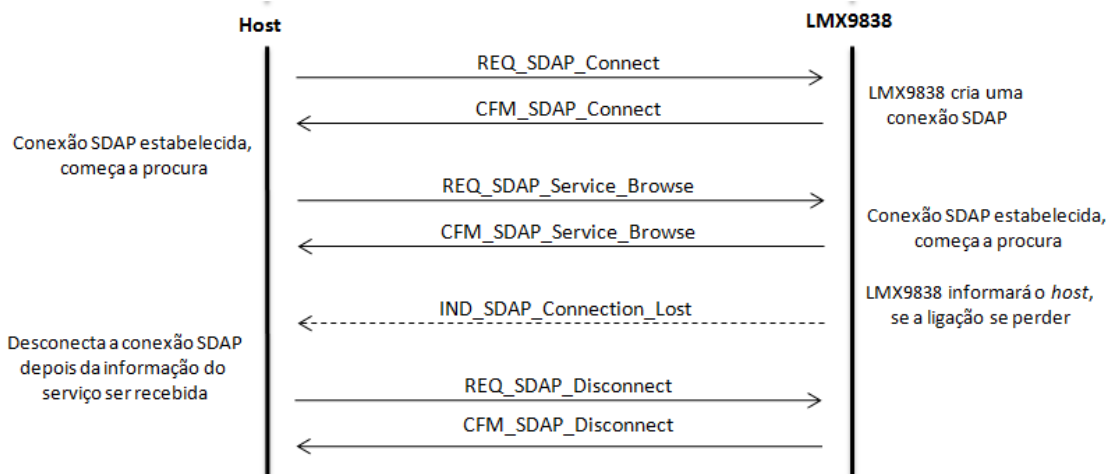


Figura 37 Procedimento de “Service Browse” (adaptado de [62]).

O procedimento começa com o estabelecimento da conexão SDAP. Depois de estabelecida a conexão é feito um pedido de informação do serviço pretendido, que neste caso é o SPP (colocar na área de dados o identificador da classe do serviço, 0x1101). Se o serviço estiver disponível e correr tudo bem com a ligação, será retornado o número da porta remota e o nome do serviço (exemplo: *PortNo:* 01, *Service Name:* COM1). Depois de recolhida toda a informação, é necessário desconectar a conexão SDAP.

“SPP Link Establishment”

Depois de obtido o endereço Bluetooth e a porta COM do dispositivo remoto, pode-se estabelecer a ligação SPP. Assim, recorrendo ao comando “SPP_Establish_Link” indica-se a porta local e estabelece-se a ligação SPP na porta remota do dispositivo com endereço Bluetooth indicado. Pode-se observar na Figura 38 o procedimento para estabelecer uma ligação SPP e trocar dados entre dispositivos.

Depois da ligação SPP estabelecida é possível trocar dados com o dispositivo Bluetooth remoto, através do comando “SPP_Send_Data”. Se o utilizador preferir pode, a partir deste ponto, transitar a ligação para “modo transparente” e assim enviar dados sem ter de recorrer aos comandos.

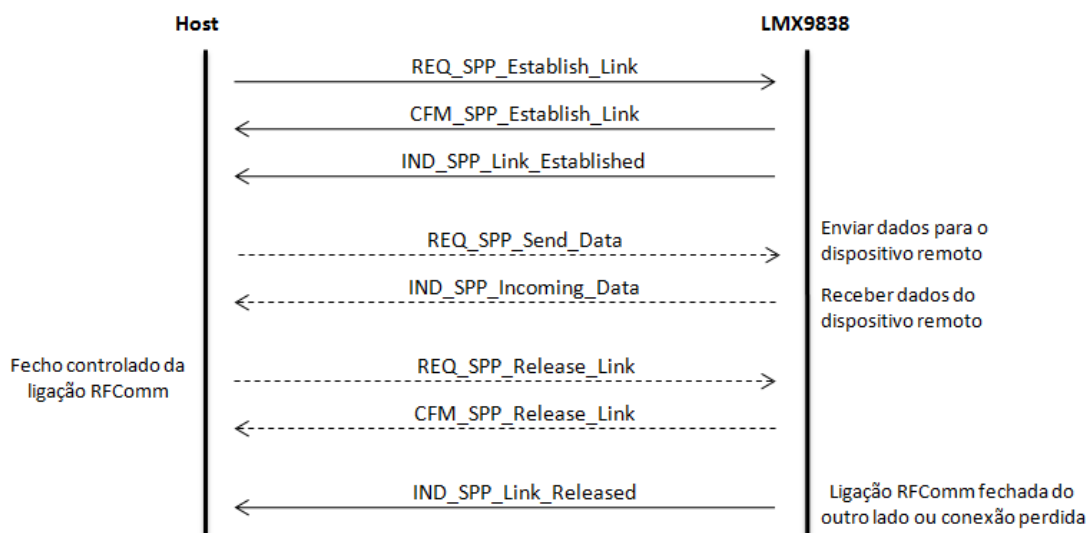


Figura 38 Procedimento de estabelecimento da ligação SPP (adaptado de [62]).

5.3. SENSORES DE FORÇA

Existe uma grande variedade de sensores de força/pressão que podem ser utilizados no desenvolvimento de um pedómetro. No entanto, a procura recaiu sobretudo sobre sensores do tipo FSR (*Force Sensing Resistor*). A escolha deste tipo de sensores deve-se ao facto de serem flexíveis, muito finos, consumirem pouca energia e serem baratos. O que é ideal para colocar por baixo do pé, de modo a que não incomode ao andar.

Os FSR são sensores que usam a propriedade eléctrica da resistência para medir a força (ou a pressão) aplicada ao sensor. Quanto maior a força aplicada menor será a resistência. A seguir são apresentadas algumas das soluções encontradas.

5.3.1. SENSORES DE FORÇA FLEXIFORCE

O sensor de força FlexiForce A201 da Tekscan, é um circuito impresso flexível e ultra-fino. É constituído por duas camadas de película de substrato (polyester ou polyimide no modelo HT201). Em cada camada é aplicada um material condutor (prata), seguido por uma camada sensível a pressão. O adesivo é usado para laminar as duas camadas de substrato, que estão juntas para formar o sensor de pressão. A área activa do sensor é definida pelo círculo de prata em cima da camada sensível a pressão. A prata estende-se desde a área sensível até aos conectores na outra ponta do sensor, formando as ligações condutoras (Figura 39) [45].

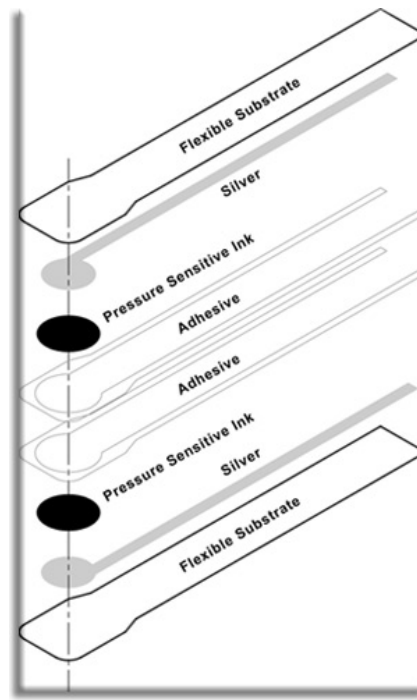


Figura 39 Modelo A201 do sensor FlexiForce [45].

O sensor de força FlexiForce actua como um FSR num circuito eléctrico. Quando o sensor de força não está a ser pressionado a sua resistência é muito elevada. Quando uma força é aplicada ao sensor, é feita uma conexão entre contactos com maior condutividade, o que diminui a sua resistência. Na Figura 40 pode-se observar a relação entre a resistência e força, deste sensor.

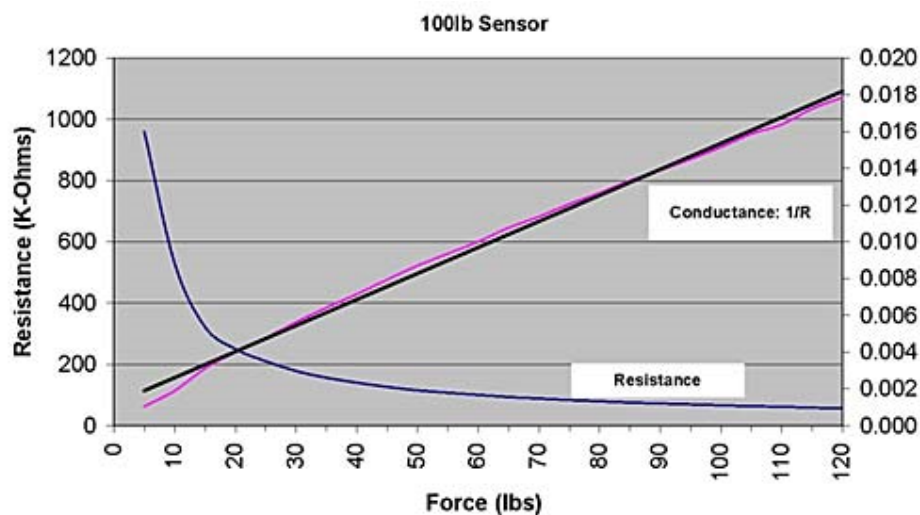


Figura 40 Relação entre força e resistência do sensor FlexiForce [45].

É de destacar o comportamento do sensor quando lhe é aplicada uma força inferior a aproximadamente 10 lbs, em que a resistência varia bruscamente. Este comportamento é

útil quando se pretende que o FSR seja projectado para interruptores. Para forças superiores a aproximadamente 30 lbs o comportamento do sensor é praticamente linear.

5.3.2. FSR DA INTERLINK ELECTRONICS

A empresa Interlink Electronics oferece uma grande variedade de sensores FSR, diferindo essencialmente no tamanho da área sensível. O seu princípio de funcionamento é idêntico ao FlexiForce. A sua constituição é formada por dois substratos flexíveis, separados por um adesivo, onde um dos substratos tem imprimido um semicondutor e o outro eléctrodos interdigitados, tal como ilustra a Figura 41.

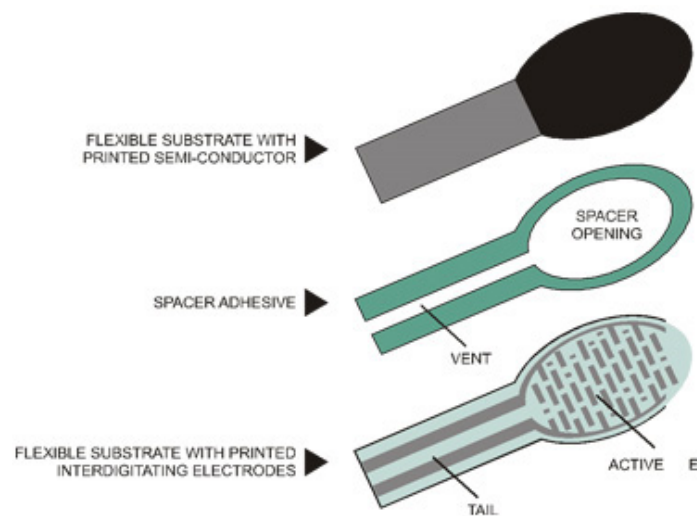


Figura 41 Constituição do FSR da Interlink Electronics [46].

Na Figura 42 encontra-se representada, num gráfico no formato logaritmo (log/log), a relação entre a força e a resistência dos FSR da Interlink.

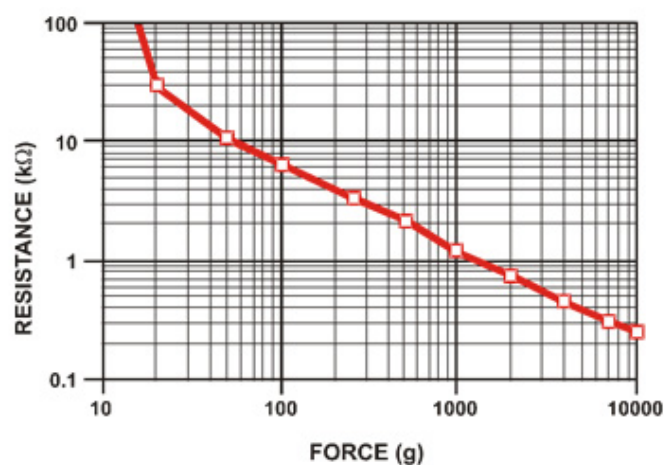


Figura 42 Relação entre resistência e a força do FSR da Interlink Electronics [46].

Analisando o gráfico, é evidente que para forças reduzidas a resposta é do tipo *switch*. Esta mudança na *threshold* (ou força de ruptura), que impulsiona a resistência de mais de 100 k Ω para cerca de 10 k Ω , é determinada pelo substrato, espessura e flexibilidade da camada, tamanho e forma do actuador, e pela espessura do adesivo de espaçamento (diferença entre os elementos condutores). A força de ruptura aumenta com o aumento do substrato, com a rigidez da camada, tamanho do actuador, e espessura do adesivo. Eliminar o adesivo, ou mantê-lo afastado da área onde a força esta sendo aplicada, como no centro de um FSR grande, vai originar uma baixa resistência de repouso [46].

Para forças elevadas a resposta acaba por saturar, até a um ponto onde um aumento de força provoca pouca ou nenhuma redução da resistência. Nestas condições da Figura 42, a força de saturação é acima dos 10 kg. O ponto de saturação é mais em função da pressão do que da força. A pressão de saturação de um FSR típico é da ordem dos 100 até 200 psi. Forças superiores à força de saturação podem ser medidas através da propagação da força sobre uma área maior, a pressão total é mantida abaixo do ponto de saturação, e a resposta dinâmica é mantida. No entanto, o efeito inverso também é verdadeiro, uma vez que actuadores mais pequenos vão saturar os FSR mais cedo, visto que o ponto de saturação é atingido com forças mais baixas [46].

5.3.3. INTERRUPTOR FLEXÍVEL

Uma solução bastante interessante apresentada pela empresa Motion Lab Systems é o interruptor flexível de membrana para o pé (Figura 43), projectado para o uso em aplicações biomecânicas. Consiste numa membrana interruptora de 25 mm de diâmetro com 15 mm de área de sensível conectado a um cabo flexível de 100 mm. A espessura de todo o sensor é de 1 mm, pesando menos de 1 g, e responde de forma confiável a pressões de 200 g aplicadas em qualquer área do sensor. Este tipo de design permite que o interruptor seja colocado debaixo de qualquer parte do pé, sendo capaz de manter uma conexão fiável com o equipamento de recepção de dados [47].

O peso e a baixa espessura deste interruptor de pé, significa que pode ser usado sob quase todas as condições de marcha sem afectar a análise desta. O reduzido tamanho permite uma elevada flexibilidade na sua colocação.



Figura 43 Interruptor flexível de membrana da Motion Lab Systems [47].

5.3.4. SENSOR DE FORÇA FX1901

A empresa Measurement Specialties disponibiliza uma série de células de carga (Figura 44), destinadas a equipamentos médicos e de consumo. A tecnologia empregue consiste em extensômetros piezoresistivos miniaturizados e fundidos com vidro a alta temperatura. O sensor possui factor de ganho superior a 100, saída ratiométrica (regulada) de 20 mV/V de amplitude e grande suporte a sobrecargas. O alcance varia entre 4,5 kgf e 45 kgf [48].

As vantagens deste tipo de sensor face aos sensores anteriormente mencionados são: a sua linearidade, robustez e ciclo de vida (“ilimitado”). Porém, o uso de um sensor destes implica que o calçado a usar contenha um compartimento para o albergar, de modo a que não incomode ao andar.



Figura 44 Sensor de força FX1901 [48].

5.4. ACELERÓMETROS

A escolha do acelerómetro a utilizar no pedómetro deve ter em consideração as seguintes características: tamanho reduzido, baixo consumo energético e gama de medição maior ou igual a 6 g. Com essas características existe uma enorme quantidade de acelerómetros. Assim, na Tabela 12 estão expostas as principais características de alguns acelerómetros que foram considerados interessantes para o desenvolvimento do pedómetro.

Tabela 12 Comparação de acelerómetros [49][50][51][52].

	VTI Technologies CMA3000-D01	Analog Devices ADXL345	ST LIS3DH	ST LIS3LV02DL
Tensão de alimentação	1,7 V – 3,6 V	2,0 V – 3,6 V	1,71 V – 3,6V	2,16 V – 3,6 V
Interfaces de saída	SPI / I2C	SPI / I2C	SPI / I2C	SPI / I2C
Eixos	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z
Gamas de medida	± 2 g, ± 8 g	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g	± 2 g, ± 6 g
Frequência de amostragem	10 Hz – 400 Hz	0,1 Hz – 3200 Hz	1 Hz – 5 kHz	40 Hz – 2560 Hz
Consumo de corrente	$\leq 70 \mu\text{A}$ a 100/400 Hz $\leq 11 \mu\text{A}$ a 40/10Hz	$90 \mu\text{A}$ a 50 Hz $3200 \mu\text{A}$ a 140 Hz	$11 \mu\text{A}$ a 50 Hz em <i>normal mode</i> $6 \mu\text{A}$ a 50 Hz em <i>low-power mode</i>	0,65 mA em operação
FIFO	Não	Sim	Sim	Não
Dimensão	2 x 2 x 0,95 mm ³	3 x 5 x 1 mm ³	3 x 3 x 1 mm ³	4,4 x 7,5x 1 mm ³
Preço unitário	7,54 € (Digi-Key)	5,22 € (Digi-Key)	3,85 € (Digi-Key)	13,57 € (Farnell)

O acelerómetro que acabou por ser escolhido foi o LIS3LV02DL da STMicroelectronics. A sua escolha não se deveu as suas características nem ao seu preço, mas sim devido ao facto de na altura da escolha o fabricante disponibilizar amostras. Apesar de cumprir todos os requisitos necessários, não era relativamente a melhor escolha.

Uma escolha interessante seria o CMA3000-D01 da VTI Technologies (Figura 45), tendo sido o acelerómetro escolhido pela Adidas para integrar o sistema miCoach, para além de ser bastante pequeno e consumir pouca energia. No entanto, os modelos ADXL345 e LIS3DH apresentam uma tecnologia bastante interessante, que é a inclusão de um *buffer* do tipo FIFO (*First In, First Out*). Esta tecnologia permite ao utilizador guardar os dados para minimizar a intervenção do processador e assim reduzir o consumo global do sistema. Tendo isso em consideração, em conjunto com o preço e o seu consumo energético extremamente reduzido, o LIS3DH parece uma boa opção.



Figura 45 Acelerómetro CMA 3000 VTI Technologies [49].

5.4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O acelerómetro usado (LIS3LV02DL) é um sistema MEM (*Micro-Electro-Mechanical System*), que como o nome indica, consiste na integração de elementos mecânicos e electrónicos num substrato de silício, através de tecnologia de microfabricação.

É um acelerómetro do tipo capacitivo, em que o elemento sensor consiste em duas placas capacitivas paralelas agindo em modo diferencial. Elas contam com um circuito portador desmodulador ou equivalente para produzir uma saída eléctrica proporcional a aceleração. Existe vários tipos de elementos capacitivos. Um dos tipos incorpora um diafragma metálico sensível com placas capacitivas de alumínio (Figura 46). Duas placas fixas imprensam o diafragma, criando dois condensadores. Cada um tem uma placa fixa e os dois partilham o diafragma com uma placa móvel [63].

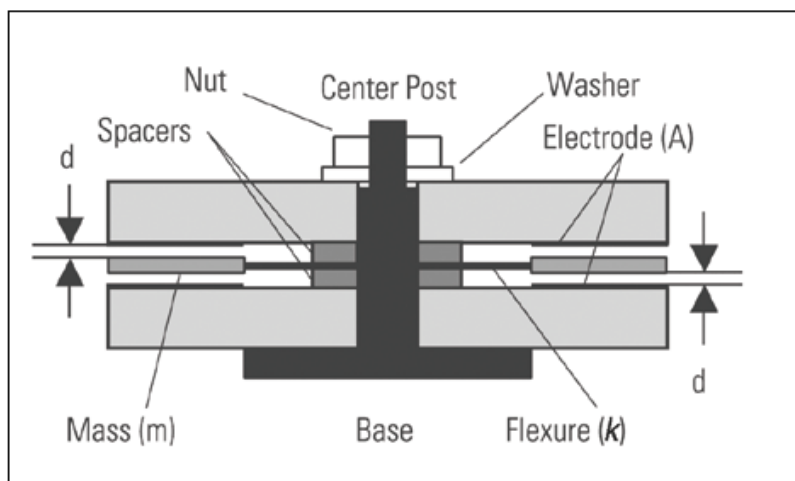


Figura 46 Constituição dos acelerómetros capacitivos [63].

Quando o sensor é exposto a uma aceleração, a massa-mola sofre uma força proporcional a massa da massa-mola, que é definida por $F = ma$. Consequentemente, a massa-mola deflecte linearmente de acordo com a equação da mola:

$$X = \frac{F}{K} \quad (7)$$

Onde “ X ” corresponde a deflexão da massa-mola e “ K ” a rigidez da massa-mola. Esta deflexão causa a variação da distância entre os eléctrodos e a massa-mola. A variação tem um efeito directo em cada um das lacunas opostas do condensador, de acordo com:

$$C = A_{\varepsilon} \left[\frac{\varepsilon}{(d \pm X)} \right] \quad (8)$$

Onde “ C ” é a capacitância, “ $A\varepsilon$ ” a área do eléctrodo, “ ε ” a constante dieléctrica, e “ d ” a distância entre a massa-mola e o eléctrodo.

Os acelerómetros capacitivos requerem um circuito interno para realizar duas funções: permitir que mudanças na capacitância se tornem úteis para medir eventos estáticos e dinâmicos, e converter as mudanças num sinal de tensão compatível com a instrumentação de leitura [63]. Na Figura 47 pode-se observar o diagrama de blocos do LIS3LV02DL, onde se destaca os três pares de condensadores (um par por cada eixo), o circuito de modulação, o circuito de ganho e a filtragem de sinal.

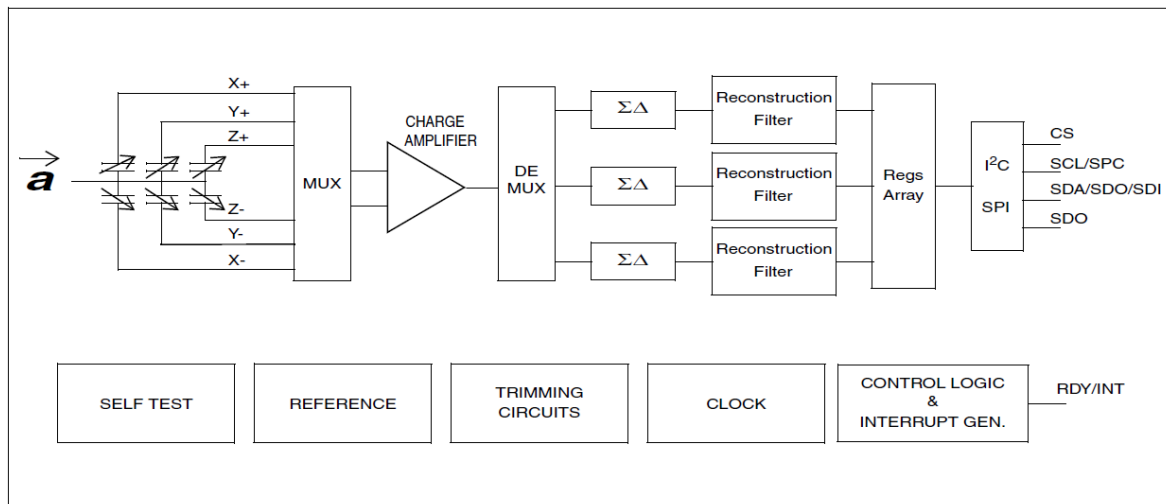


Figura 47 Diagrama de blocos do acelerómetro LIS3LV02DL [52].

5.5. FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Para fornecer energia ao sistema é necessário utilizar uma bateria, que perante os componentes seleccionados, deve ter uma tensão entre 3 V e 5 V, e convém que seja o mais pequena e leve possível. Com essas características, a melhor solução seria as baterias do tipo “moeda”, tal como a bateria de lítio recarregável Lir2477 da empresa PowerStream (Figura 48). Esta bateria apresenta a seguintes características:

- Tensão nominal: 3,6 V;
- Capacidade: 160 mAh;

- Descarga máxima: 300 mA;
- Ciclo de vida: 500 vezes;
- Dimensões: 24,5 mm x 8,4 mm;
- Peso: 7,8 g.



Figura 48 Bateria de lítio Lir2477 [64].

Contudo, para efeito de testes e validação do protótipo optou-se por fazer a reutilização da bateria de um telemóvel. Bem como utilizar o próprio telemóvel para a voltar a carregar, quando necessário. A bateria usada foi a BL-5C de 3,7 V da Nokia (Figura 49). É uma bateria com dimensões e peso superior mas que possui muito maior capacidade (1090 mAh), relativamente as baterias do tipo “moeda”.



Figura 49 Bateria BL-5C de 3,7V [65].

5.5.1. CONVERSOR *BUCK-BOOST*

Uma característica inerente das baterias é a redução do valor da tensão fornecida à medida que descarregam. Assim, e de modo que o sistema funcione correctamente, é necessário procurar uma solução que permita manter a tensão de alimentação estável ao longo do tempo. A solução encontrada foi utilizar o conversor *buck-boost* TPS63031 da empresa Texas Instruments. Este dispositivo permite fornecer uma tensão fixa de 3,3 V a saída, perante tensões de entrada que podem variar entre 1,8 V e 5,5 V. As suas principais características são [66]:

- Eficiência até 96 %;

- Tensão de entrada entre 1,8 V e 5,5 V;
- 800 mA de corrente de saída a 3,3 V em modo *Step Down* ($V_{IN} = 3,6V$ até 5,5 V);
- Até 500 mA de corrente de saída a 3,3 V em modo *Boost* ($V_{IN} > 2,4V$);
- Transição automática entre modo *Step Down* e modo *Boost*.

O TPS63031 (Figura 50), fornece uma fonte de alimentação a dispositivos alimentados a baterias alcalinas de duas ou três células, baterias de níquel-cádmio (NiCd) ou hidreto de níquel-metal (NiMH), ou baterias de uma célula de lítio-íon (Li-Ion) ou *Li-Polymer*. O conversor *buck-boost* é baseado numa frequência fixa, tendo o controlador PWM (modulação de largura de impulso) de usar rectificação síncrona para obter eficiência máxima. Em baixas correntes de carga, o conversor entra em modo *Power Save*, de modo a manter uma elevada eficiência sobre uma grande gama de correntes de carga. O modo de *Power Save* pode ser desactivado (no pino PS/SYNC), forçando o conversor a operar a uma frequência fixa de comutação. A corrente máxima suportada pelos comutadores é de 1000 mA e a tensão de saída (3,3 V) é fornecida por um divisor de tensão interno. Durante o encerramento a carga é desconectada da bateria [66].

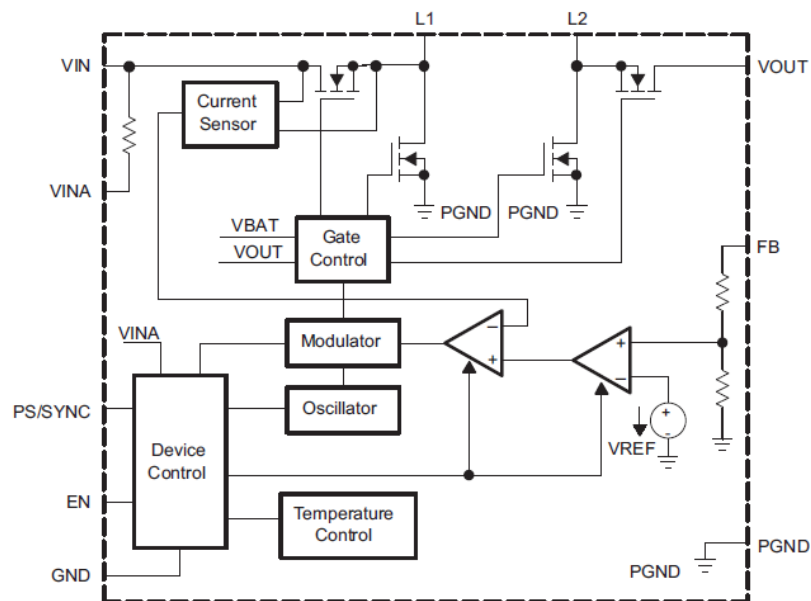


Figura 50 Diagrama de blocos do TPS63031 [66].

6. PROTÓTIPO

Neste Capítulo vão ser abordados todos os aspectos relacionados com o protótipo desenvolvido. Inicialmente serão explicadas as partes que constituem o circuito eléctrico, passando a ser explicado o código do microcontrolador e a interface gráfica.

6.1. CIRCUITO ELÉCTRICO

O circuito eléctrico desenvolvido encontra-se dividido em vários elementos, sendo esses elementos: a bateria, o conversor de corrente continua (TPS63031), o microcontrolador (PIC18F25J50), o acelerómetro (LIS3LV02DL), o módulo Bluetooth (LMX9838) e os sensores de pressão. A bateria de 3,7 V alimenta o conversor de corrente contínua, que por sua vez alimenta os restantes elementos, com uma tensão constante de 3,3 V. O microcontrolador comunica com o acelerómetro por I²C, utiliza a interface UART para comunicar com o módulo Bluetooth e recebe a informação dos sensores de pressão pelo conversor analógico-digital (A/D). A interligação dos elementos está representada na Figura 51.

No Anexo C pode-se ver o circuito eléctrico completo, a respectiva placa de circuito impresso (PCB) e as tabelas com a correspondência dos pinos dos conectores.

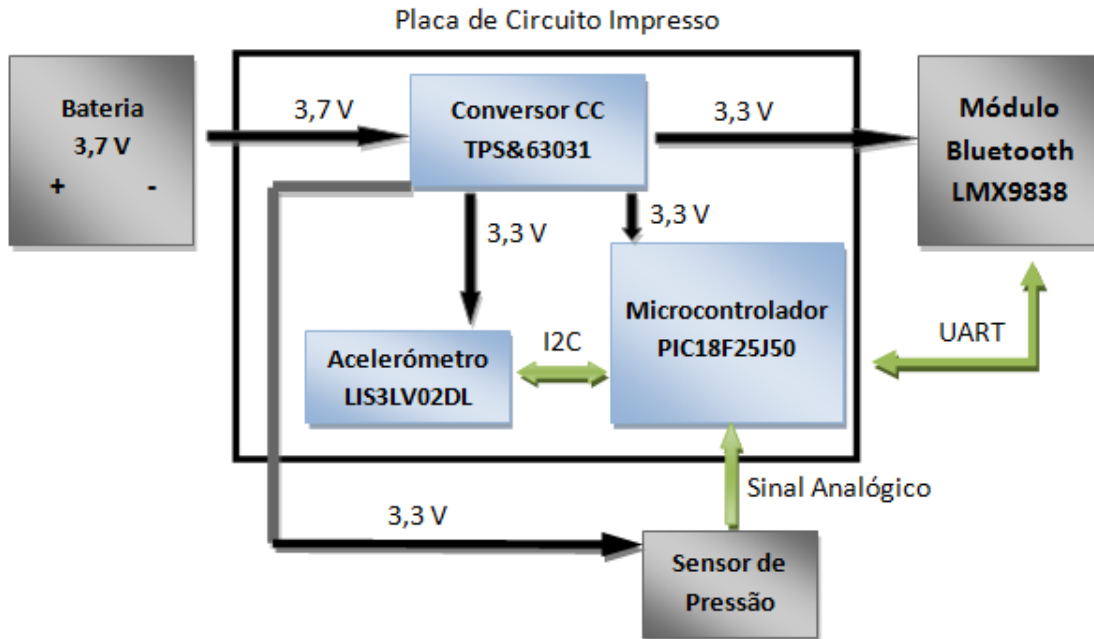


Figura 51 Diagrama do protótipo.

6.1.1. CIRCUITO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Como fonte de alimentação foi usada a bateria BL-5C em conjunto com o TPS63031. O circuito usado está representado na Figura 52. Com este circuito é possível obter uma tensão de alimentação fixa de 3,3 V e uma corrente de 500 mA, quando a tensão de entrada é superior a 2,4 V.

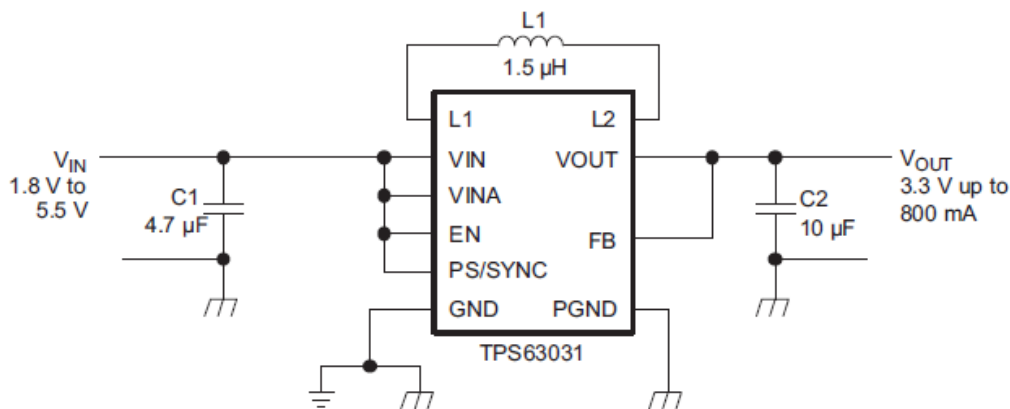


Figura 52 Esquema de ligação do conversor *buck-boost* TPS63031 [66].

6.1.2. CIRCUITO DO MICROCONTROLADOR

O circuito que rodeia o microcontrolador (Figura 53) contém as seguintes particularidades:

- Cristal de 4 MHz;
- Um botão para reset e um botão para uso genérico na aplicação;

- Dois leds para uso na aplicação;
- Circuito de programação (ou alimentação alternativa), para usar com o programador PICkitT 2 da Microchip.

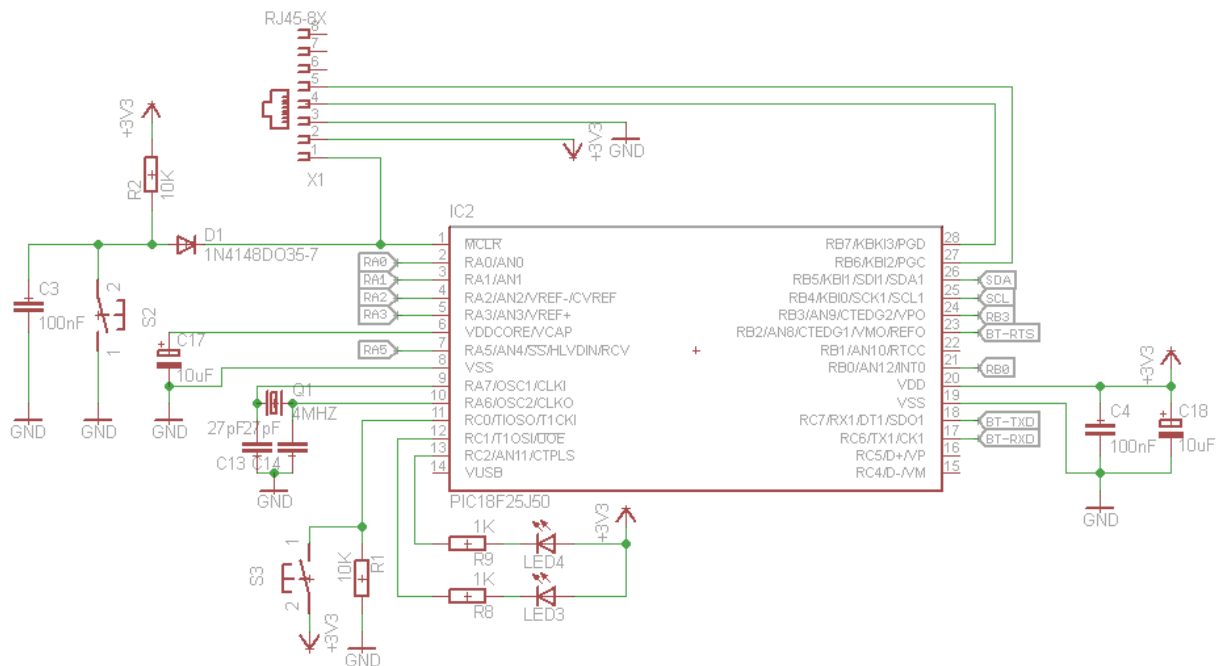


Figura 53 Circuito do microcontrolador.

6.1.3. CIRCUITO DO MÓDULO BLUETOOTH

O circuito adjacente ao módulo Bluetooth (Figura 55) foi montado na mesma placa do microcontrolador, no entanto o módulo foi soldado noutra placa. O que quer dizer, que no circuito do Anexo C não é perceptível a representação do módulo LMX9838, mas sim dois conectores *flat cable* de 14 pinos. O circuito da Figura 55 é uma representação explícita do circuito implementado. O recurso aos conectores permite a reutilização do módulo Bluetooth noutra aplicação, ou na placa de ensaio para efectuar testes.

A interface UART, por defeito, do LMX9838 (Figura 54) consiste em quatro sinais:

- TX (*Transmit output*);
- RX (*Receive input*);
- RTS (*Ready-to-Send output*);
- CTS (*Clear-to-Send input*).

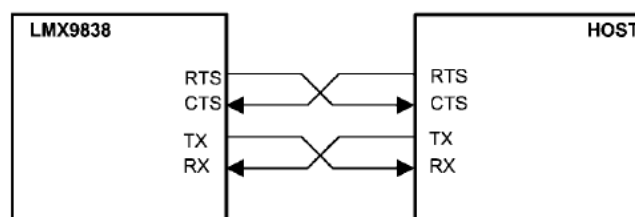


Figura 54 Interface UART do módulo LMX9838 [62].

Contudo, o LMX9838 também permite uma comunicação só com os sinais TX e RX. Este foi o tipo de comunicação usada, mas implica ter em consideração os seguintes aspectos:

- A entrada CTS tem de estar ligada a massa, para que o dispositivo comece a enviar dados;
- Deve ser usado o modo de comandos (*Command Mode*), nomeadamente o comando “SPP Send Data”, para que exista um “controlo de fluxo por *software*”. Visto que, a cada comando bem sucedido o LMX9838 responde com 0x00;
- Não deve ser usado modo transparente (*Transparent Mode*), pois não existe controlo de fluxo.

No circuito da Figura 55 a linha RTS não está conectada e a linha CTS está a massa. Contudo, no circuito Anexo C essas linhas estão ligadas ao microcontrolador, que vai fazer exactamente a mesma função. Isto é, vai ignorar a linha RTS e colocar em estado lógico “0” a linha CTS. A ligação destas linhas ao microcontrolador permite uma maior flexibilidade num desenvolvimento futuro.

O circuito contém dois leds de estado. O “LED1” permanece ligado quando o módulo não está conectado com outro dispositivo Bluetooth. O “LED2” pisca para indicar a comunicação com outro dispositivo, caso contrário permanece aceso.

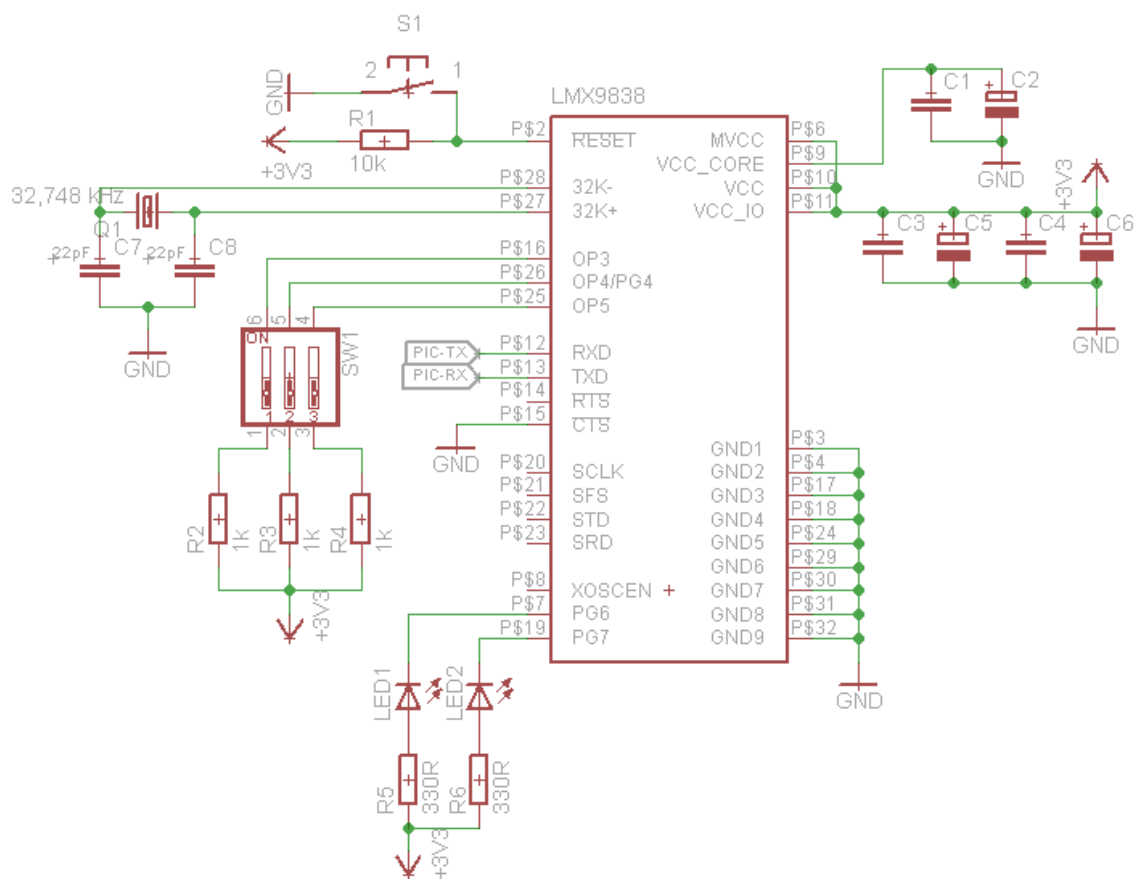


Figura 55 Circuito do módulo LMX9838.

O módulo permite definir a taxa de transferência de dados da ligação (*Baudrate*), através da combinação dos estados das entradas OP3, OP4 e OP5. Na Tabela 13 estão as combinações possíveis das entradas para obter os respectivos *baudrates*.

Tabela 13 Selecção do *Baudrate* do LMX9838.

<i>Baudrate</i>	OP3	OP4	OP5
9600 bps	1	0	1
115,200 bps	1	1	0
921,600 bps	1	1	1
Ler da memória	1	0	0

6.1.4. CIRCUITO DO ACELERÓMETRO

O circuito do acelerómetro (Figura 56) é bastante simples, só exige dois condensadores de desacoplamento. Foram também adicionadas duas resistências de *pull-up* de 2,2 k Ω nas linhas I²C.

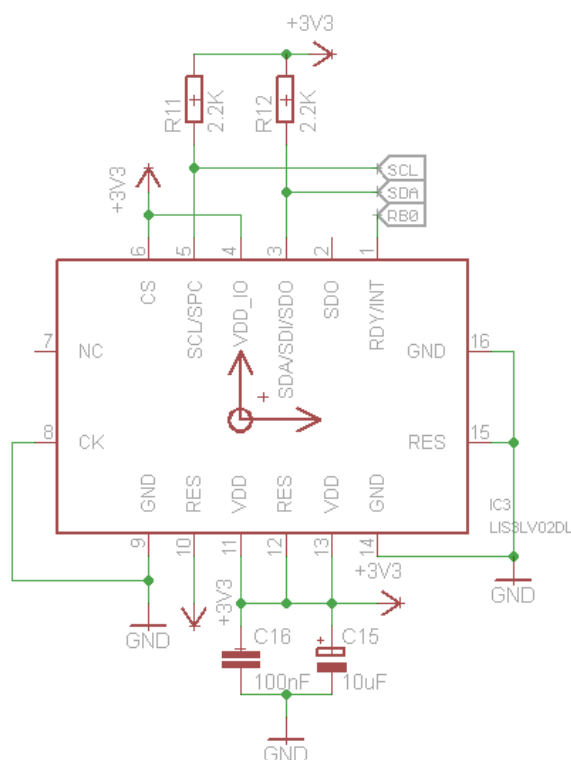


Figura 56 Circuito do acelerómetro.

6.1.5. CIRCUITO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DO SENSOR DE PRESSÃO

Com o uso dos sensores de pressão (FSR) pretende-se, sobretudo, verificar em que altura o pé está em contacto com solo. Para o obter essa informação o circuito do tipo comparador é o mais indicado (Figura 57).

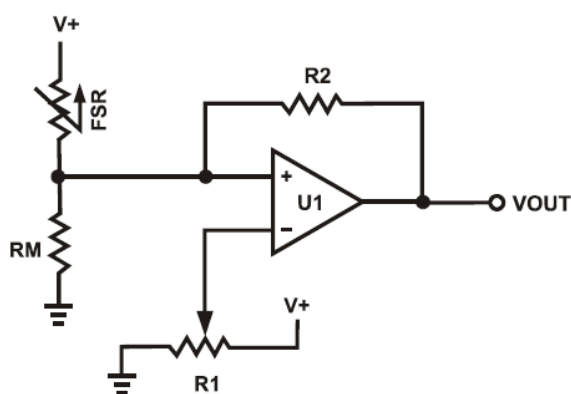


Figura 57 Configuração do tipo comparador [71].

Nesta configuração, a entrada não-inversora do amplificador é impulsãoada pela saída do divisor de tensão (constituído pelo FSR e pela resistência RM), que é uma tensão que aumenta com a força. Para uma força igual a zero, a saída do amplificador vai ser “0”. Quando a tensão na entrada não-inversora exceder a tensão da entrada inversora, a saída do

amplificador vai ser “1”. A tensão de “disparo” (o limite da força) é definida na entrada não-inversora pelo potenciômetro R1. A histerese, R2, elimina os disparos múltiplos que possam ocorrer [71].

Se for constatado que o valor da força exercida pelo pé no solo é útil para a determinação do passo, pode-se utilizar uma configuração do tipo divisor de tensão (Figura 58).

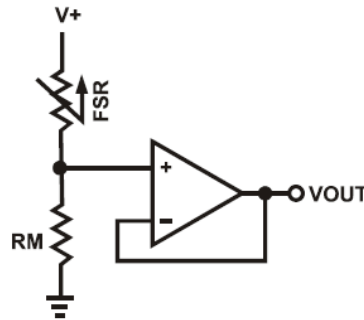


Figura 58 Configuração do tipo divisor de tensão [71].

Nesta configuração é feita uma conversão simples força-tensão, de acordo com a seguinte fórmula:

$$VOUT = (V+) / [1 + RFSR/RM] \quad (9)$$

A tensão de saída (VOUT) aumenta com o aumento da força. Se trocar a posição do sensor (FSR) por RM, a saída passa a decrescer com o aumento da força. O valor da resistência RM é ajustado de acordo com o sensor utilizado, para os sensores da Interlink (referidos na secção 5.3.2) o valor de resistência é 10 kΩ, para uma saída máxima de 3,3V.

6.2. PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR

O programa para o microcontrolador foi desenvolvido em linguagem C, no compilador PCW versão 4.110, da empresa CSS.

A estrutura geral do programa é constituída pelas seguintes partes: uma sequência de inicializações, um algoritmo de detecção de passo, uma interrupção de recepção de dados na USART e uma interrupção do Timer3. Na Figura 59 pode-se ver o fluxograma que demonstra o funcionamento geral do programa.

Durante esta secção vão ser explicas as diversas partes que constituem o programa.

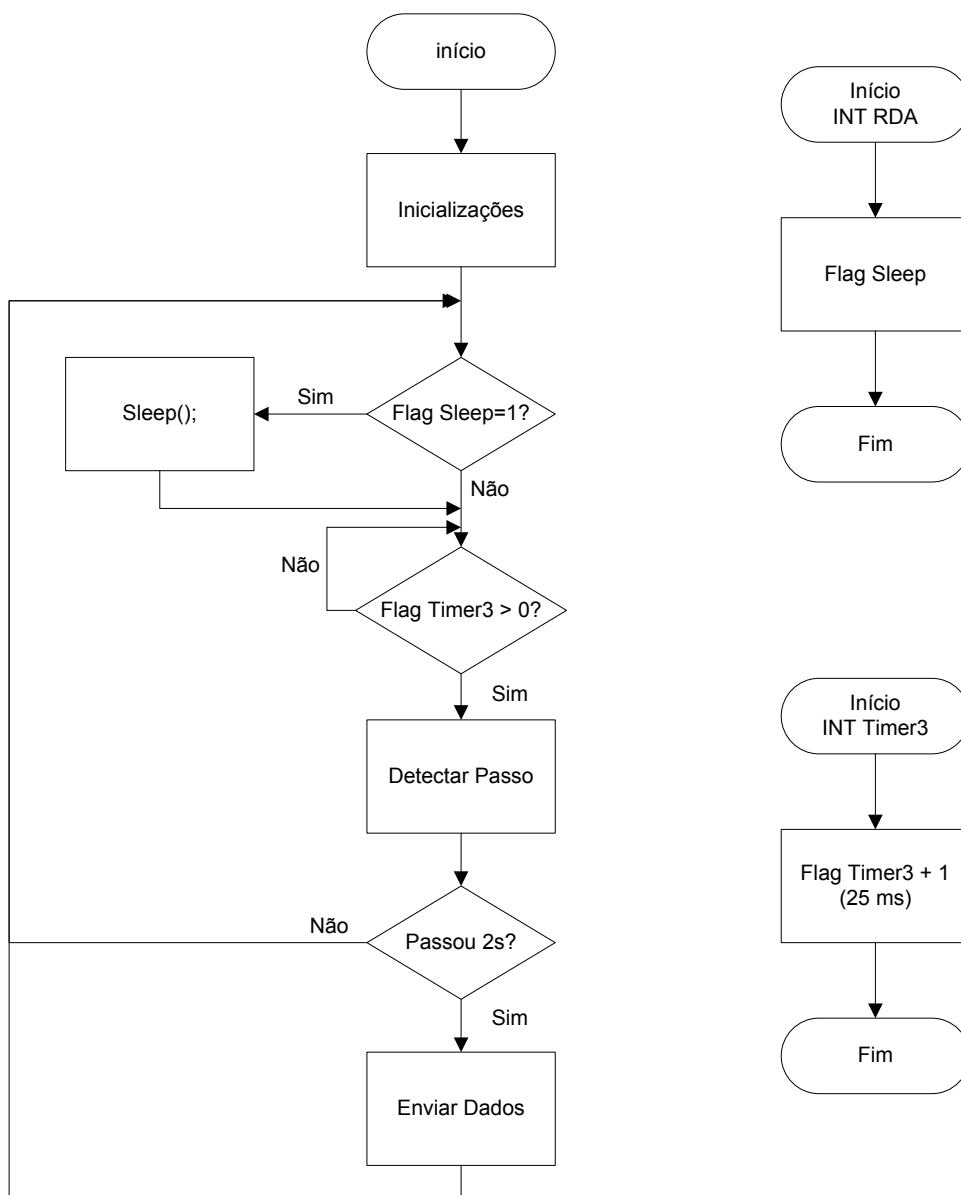


Figura 59 Fluxograma geral do programa.

Depois da configuração do Timer3 e da configuração do acelerómetro é estabelecida a ligação com o dispositivo móvel, que suporta a interface gráfica. Assim que a ligação é estabelecida o microcontrolador é colocado em modo *idle* (através da chamada da função *sleep*). Isto é, o CPU é desligado, mas é activado oscilador interno de tempo real (RTC) que fornece uma frequência de 32 kHz aos periféricos. A activação deste oscilador é necessária para que se possa “acordar” o microcontrolador através da interrupção de recepção de dados na USART. Para originar essa interrupção é necessário enviar um carácter para a USART, que será descartado. Tendo isso em conta, antes de se enviar um

comando a partir da interface gráfica, é necessário enviar um carácter para “acordar” o microcontrolador.

Está prevista a recepção de quatro comandos vindos da interface gráfica, esses comandos são:

- Comando de fim (carácter “F”) – que origina o reinício das variáveis e a entrada do microcontrolador em modo *Idle*;
- Comando de início (carácter “I”) – que origina a saída do modo *idle* e a execução da rotina de detecção de passo;
- Comando de pausa (carácter “S”) – que coloca o microcontrolador em modo *idle*, mas não reinicia as variáveis;
- O comando de retomar (carácter “R”) – que origina a saída do modo *idle* e a continuação do programa.

Depois da recepção do comando de início começa o ciclo de detecção de passo. Este ciclo tem em consideração que os valores da aceleração são actualizados a cada 25 ms (40 Hz), e como tal, o ciclo apresenta essa cadência de funcionamento. Para se efectuar a leitura dos valores do acelerómetro é utilizado o *Timer3*, que origina uma interrupção a cada 25 ms. Quando a *flag*, presente na rotina de atendimento a interrupção do *Timer3*, for maior que “1” dá-se início a leitura dos valores da aceleração. Perante os valores da aceleração, actuais e anteriormente obtidos, recorre-se a um algoritmo para verificar a ocorrência de um passo. Se tiver existido um passo são incrementadas duas variáveis: a do número total de passos efectuados e a do número de passos em intervalos de dois segundos. Depois, a cada oitenta amostras de valores da aceleração (intervalos de 2 segundos), são transmitidos para a interface gráfica os resultados obtidos.

6.2.1. INICIALIZAÇÕES

Existe duas inicializações fundamentais a fazer, a configuração do acelerómetro e o estabelecimento da ligação Bluetooth.

Para configurar o acelerómetro à que ter em atenção que o protocolo de comunicação usado é o I²C, com uma frequência do sinal de relógio de 100 kHz. A configuração usada permite:

- Activar do acelerómetro;
- Definir a frequência de actualização de dados de 40 Hz;

- Activar os eixos X, Y, Z;
- Seleccionar a escala de $\pm 6g$;
- Seleccionar a representação Big Endian (o valor mais significativo é o primeiro a ser enviando);
- Seleccionar a representação de 16 bits justificados a esquerda.

No que diz respeito ao estabelecimento da ligação Bluetooth, há que respeitar os procedimentos explicados na secção 5.2.5. No fluxograma da Figura 60 está representada a sequência de comandos necessários para criar uma ligação SPP.

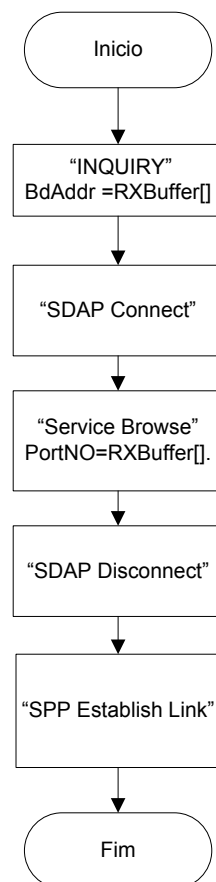


Figura 60 Fluxograma do estabelecimento da ligação Bluetooth.

O procedimento começa com um pedido de “Inquiry”, para procurar o dispositivo na área de alcance. Se o dispositivo for encontrado, este vai responder com o seu endereço Bluetooth. De seguida é estabelecida uma ligação SDAP, de modo a se poder utilizar o comando “SDAP_Service_Browse” para solicitar o número da porta COM remota. Obtida essa informação, a ligação SDAP é desconectada e é estabelecida a ligação SPP no endereço Bluetooth e porta COM recebidos.

6.2.2. DETECÇÃO DE PASSO

Antes de se explicar como é que se procedeu para detectar os passos, salienta-se que quando se fala em passos detectados, refere-se ao número de passos que foram realizados pela perna onde está colocado o sensor. Sendo o número de passos total realizados pela pessoa sensivelmente o dobro.

Para detectar os passos efectuados foram desenvolvidos dois algoritmos diferentes: o da “aceleração composta” e o da “aceleração simples”. O desenvolvimento do algoritmo da “aceleração composta” tinha como objectivo a possibilidade de utilizar o sensor em qualquer orientação. Para cumprir esse objectivo recorreu-se ao uso da aceleração composta, obtida pela seguinte fórmula:

$$A = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (10)$$

Onde “A” é a aceleração composta, “X” a aceleração no eixo do X, “Y” a aceleração no eixo dos Y e “Z” a aceleração no eixo dos Z. Com este método é possível obter um comportamento idêntico da aceleração independente da orientação do sensor. Contudo, depois vários testes efectuados, verificou-se uma influência indesejada da aceleração lateral (quando o sensor é colocado na perna junto ao tornozelo), acabando por ser retirada, resultando na seguinte fórmula:

$$A = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (11)$$

De modo a se entender o paradigma envolvido, pode-se verificar na Figura 61 o comportamento da aceleração composta. Em que o “X” corresponde a aceleração frontal (avanço), o “Y” a aceleração vertical e o “A” a aceleração composta das anteriores.

Na Figura 61 estão representados nove passos efectuados com o pé esquerdo, por cada passo distingue-se:

1. Fase intermédia de apoio (balanço imediatamente antes de levantar o calcanhar);
2. Elevação do calcanhar;
3. Desaceleração vertical depois da elevação dos dedos dos pés e início de elevação da perna;
4. Contacto do calcanhar no solo;
5. Planta do pé no solo.

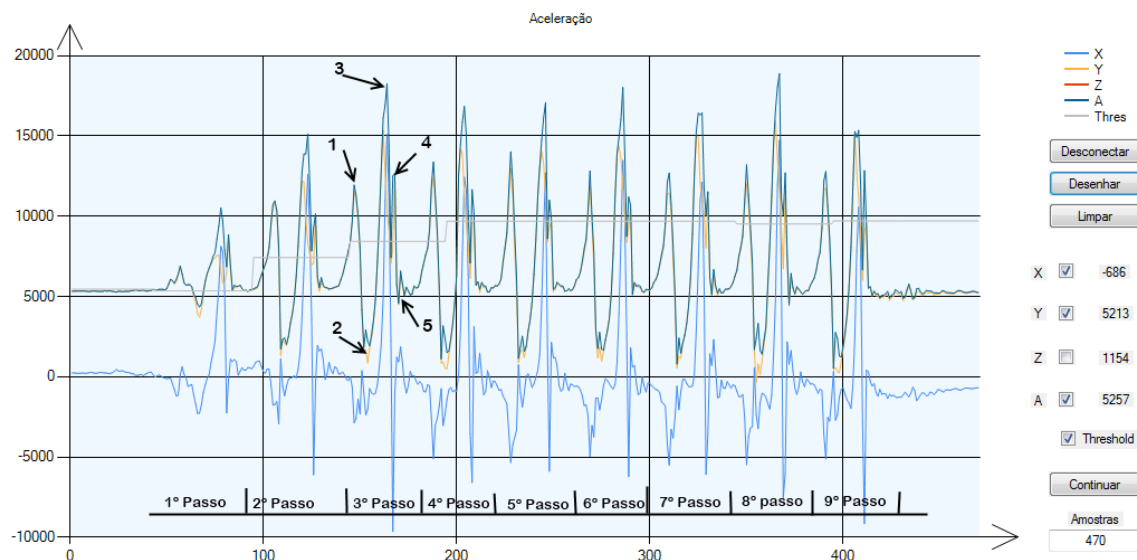


Figura 61 Aceleração composta com as componentes x e y.

Perante este comportamento cíclico desenvolveu-se o algoritmo representado no fluxograma da Figura 62. O algoritmo da “aceleração composta” tem as seguintes características:

- É executado a cada 25 ms – valor ao qual o acelerómetro actualiza os valores da aceleração;
- Recolhe o valor inicial da aceleração composta – a média das primeiras quatro leituras da aceleração composta, para verificar quando é que ocorre uma transição abaixo desse valor. Este valor rondará os 5461, que equivale a 1 g, o mesmo que a aceleração da gravidade;
- Utiliza uma média progressiva de quatro valores da aceleração – média de quatro valores que contém sempre os últimos quatro valores da aceleração composta;
- Utiliza um valor limite (*threshold*) para determinar os picos – valor que é calculado a cada 50 amostras da aceleração, através da seguinte fórmula:

$$threshold = (Amax + Amin) / 2 \quad (12)$$

Onde “Amax” é a aceleração composta máxima e “Amin” a aceleração composta mínima. A variação da *threshold* pode ser verificada no gráfico da Figura 61, representado pela linha “Thres”;

- O passo ocorre quando se verifica a ocorrência das seguintes estados (da “Step_flag”):
 1. A média supera o valor da *threshold*;
 2. A média desce abaixo da *threshold* e a aceleração composta desce abaixo do valor inicial;

3. A média supera novamente a *threshold* e a aceleração composta é superior a 12000;
 4. A média desce abaixo do *threshold* e a aceleração composta é menor que 7500.
- O passo só é declarado válido e contabilizado se ocorrerem as condições acima, e se tiver ocorrido no intervalo $[0,2; 2]$ s, o equivalente a um número de amostras entre 8 e 80. Isto porque foi considerado que uma pessoa não efectua dois passos seguidos (com o mesmo pé), num tempo inferior a 0,2 segundos ou superior a 2 segundos;
 - Sempre que se utiliza a *threshold* para se verificar o estado da aceleração é adicionado ou subtraído à *threshold* um valor de calibração. Este valor tem como finalidade diminuir o erro na detecção de passo e foi obtido através dos testes experimentais, tais como o já demonstrado na Figura 61.

Depois de desenvolvido o algoritmo da “aceleração composta” e de realizados vários testes, para verificar o comportamento da aceleração, decidiu-se desenvolver um algoritmo mais directo e simples (representado no fluxograma da Figura 63). A abordagem neste algoritmo (“aceleração simples”) é que o sensor tem de estar numa posição fixa e pré-determinada. Assim, assumiu-se que o correcto posicionamento do sensor seria na perna esquerda junto ao tornozelo, em que o eixo do X do acelerómetro medisse a aceleração frontal e o eixo dos Y a aceleração vertical.

No algoritmo da “aceleração simples” não é utilizado a aceleração composta, mas sim os valores independentes da aceleração no X e no Y. Decidiu-se também utilizar os valores actuais da aceleração em vez de uma média. Com isto, e tendo em conta o comportamento da aceleração demonstrado na Figura 61, assume-se que um passo ocorre quando se verifica os seguintes estados:

1. A aceleração em Y desce abaixo do valor inicial;
2. A aceleração em Y ultrapassa o valor de 7500;
3. A Aceleração em X ultrapassa o valor de 5000.

Quando se verifica um dos estados acima mencionados é incrementado um valor a “Step_flag”, avançando assim para o estado seguinte. A “Step_flag” é reiniciada quando se verificar todos os estados. O “valor inicial” que é utilizado na verificação do primeiro estado, é a média das primeiras quatro leituras da componente vertical da aceleração (“Y”). Os valores que são utilizados na verificação do segundo e terceiro estado foram obtidos através da análise dos testes experimentais, como o da Figura 61.

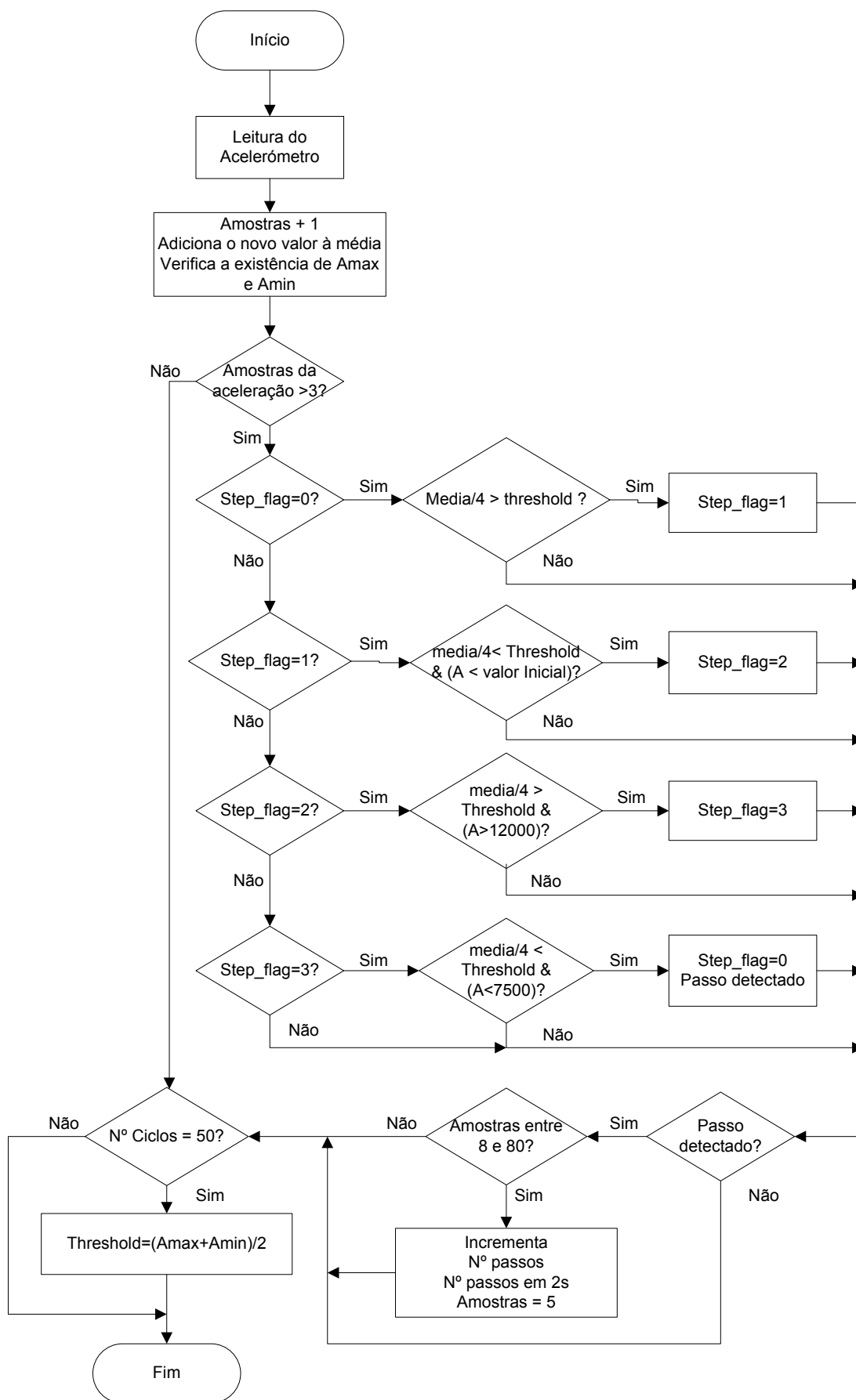


Figura 62 Fluxograma do algoritmo da aceleração composta.

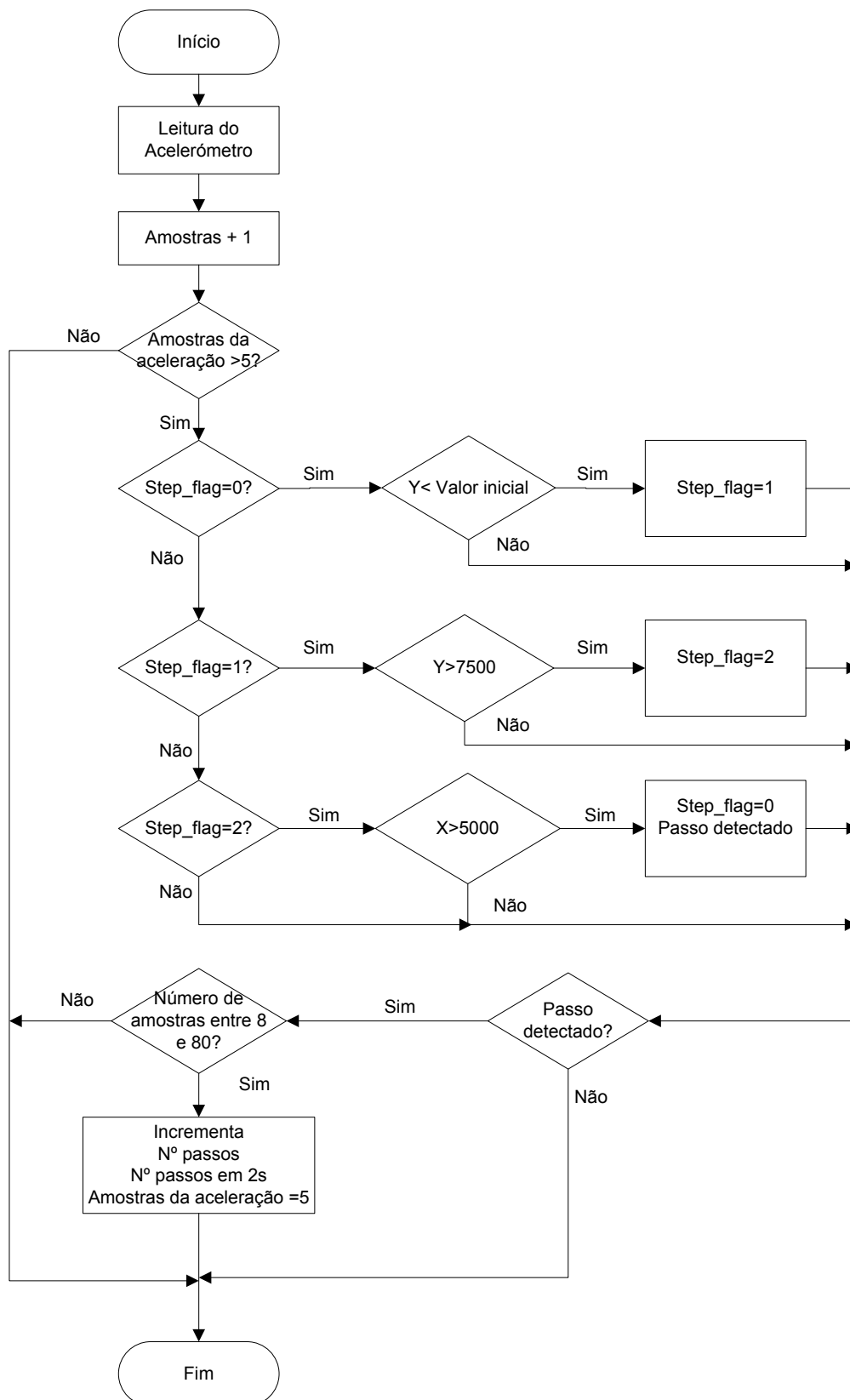


Figura 63 Fluxograma do algoritmo da aceleração simples.

6.2.3. LEITURA DO ACELERÓMETRO

Durante a execução do algoritmo é executada uma rotina de leitura do acelerómetro. Esta rotina utiliza o protocolo I²C e está representada no fluxograma da Figura 64.

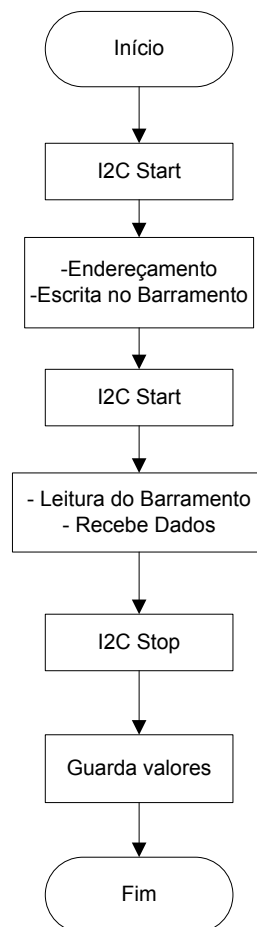


Figura 64 Fluxograma para leitura do acelerómetro.

Cada componente da aceleração está dividida em 2 bytes. Depois de obtidos esses dois Bytes são anexos numa variável de 16 bits, que seguidamente vai sofrer o complemento para 2 (representação binária de um número negativo) de modo a se obter o valor inteiro com sinal.

6.2.4. INTERRUPÇÃO DE RECEPÇÃO DE DADOS NA USART

Os dados recebidos por Bluetooth são lidos na interrupção que ocorre sempre que é recebido um byte na USART. Nesta rotina é feita a interpretação do pacote de comando (explicado na secção 5.2.4), e é verificado se foi recebida uma ordem a partir da interface gráfica, para entrar em modo *sleep* ou para sair dele. Na Figura 65 pode-se verificar como todo o procedimento é feito.

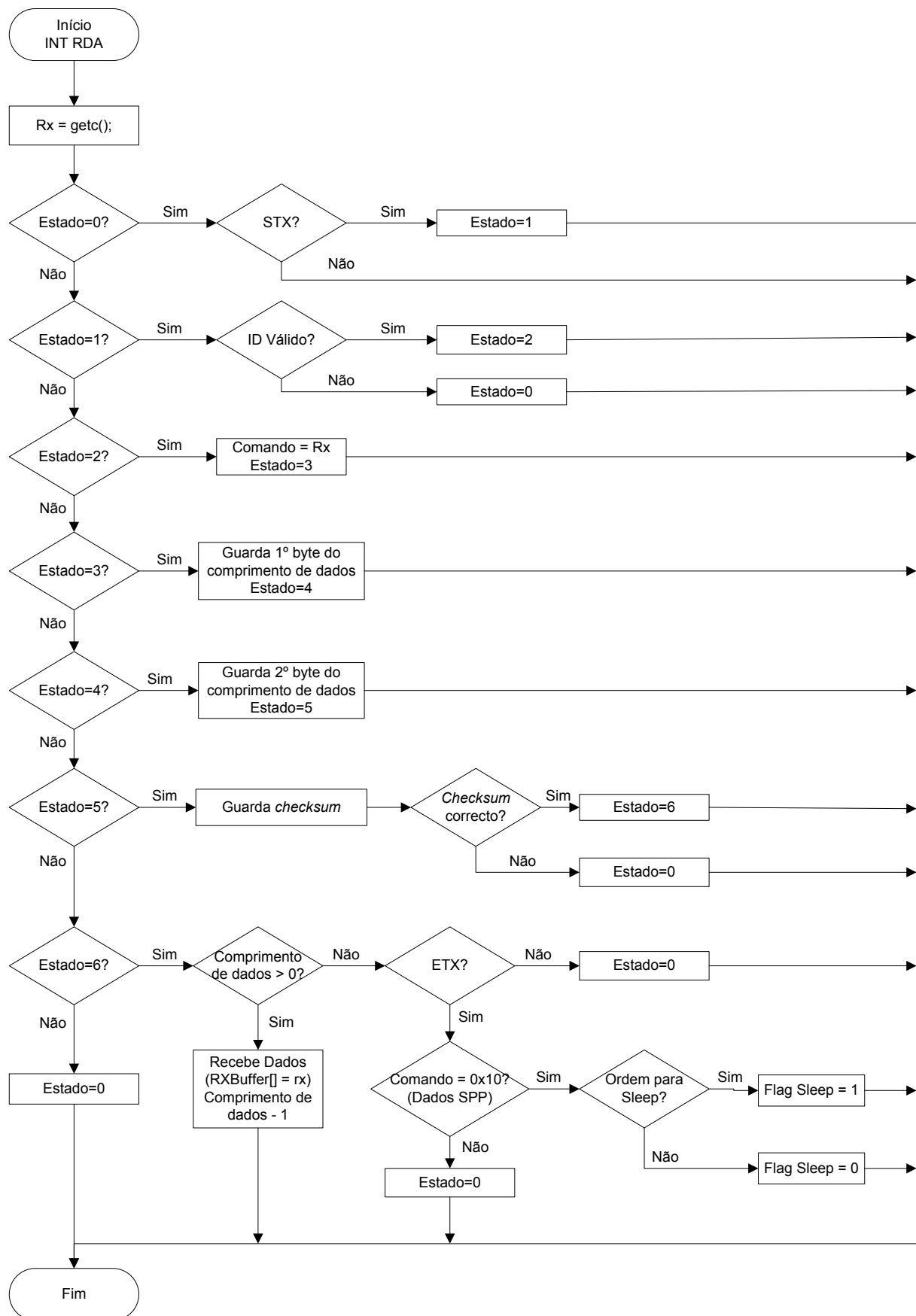


Figura 65 Fluxograma da interrupção originada por dados recebidos na USART.

6.2.5. ENVIO DE DADOS POR BLUETOOTH

Em intervalos de dois segundos é enviado uma trama (Figura 66) com os seguintes valores:

- Um carácter ASCII “A” – valor fixo para indicar o início de uma remeça de dados e uma maneira de controlar possíveis erros de transmissão;
- Quatro caracteres ASCII representativos do valor do número total de passos;
- Um carácter ASCII representativo do número de passos efectuados num intervalo de dois segundos.

Carácter “A”	Número de passos total	Número de passos em 2 s
1 Byte	4 Bytes	1 Byte

Figura 66 Trama enviada por Bluetooth.

O valor do número de passos está guardado numa variável inteira de 32 bits, este valor é decomposto, a cada transmissão, em quatro caracteres ASCII. O mesmo acontecendo com a variável inteira de 8 bits que contém o número de passos ocorridos a cada dois segundos. Desta forma o número de bytes enviados é constante, permitindo uma recepção de dados mais fácil e uma transmissão mais rápida.

Depois da conversão dos valores para caracteres ASCII é chamada uma rotina que compõem o pacote de comando (“SPP Send Data”) e envia os dados para a USART. São enviados pela USART um total de 15 bytes, mais um *start* e um *stop* bit por cada byte, demorando aproximadamente 1,3 ms a transmitir (com um *baudrate* de 115200 bps).

6.3. INTERFACE GRÁFICA COM O UTILIZADOR

A plataforma para a interface gráfica era para ser um telemóvel ou um PDA. Contudo, devido à não disponibilidade de um telemóvel ou PDA, que suportasse o perfil Bluetooth SPP, necessário para a comunicação com o módulo Bluetooth LMX9838, foi necessário utilizar como plataforma um PC portátil com Bluetooth. Assim, a interface gráfica desenvolvida (aplicação “Pedómetro ISEP”) foi programada em Visual Basic com o *software* Microsoft Visual Basic 2008 Express Edition.

Na Figura 67 está representada a estrutura da aplicação “Pedómetro ISEP”. É uma estrutura simples, que está assente em separadores (*tabs*), permitindo assim uma rápida transição ente as funcionalidades. É constituída por três separadores principais:

“Pedómetro”, “Opções” e “Estatísticas”. Dentro do separador “Estatísticas” existe mais dois separadores, o “Tabela” e “Gráfico”. No separador “Tabela” é permitida a visualização de duas tabelas diferentes, uma que possibilita a visualização dos valores por corridas e outra que possibilita a visualização dos valores por dias.

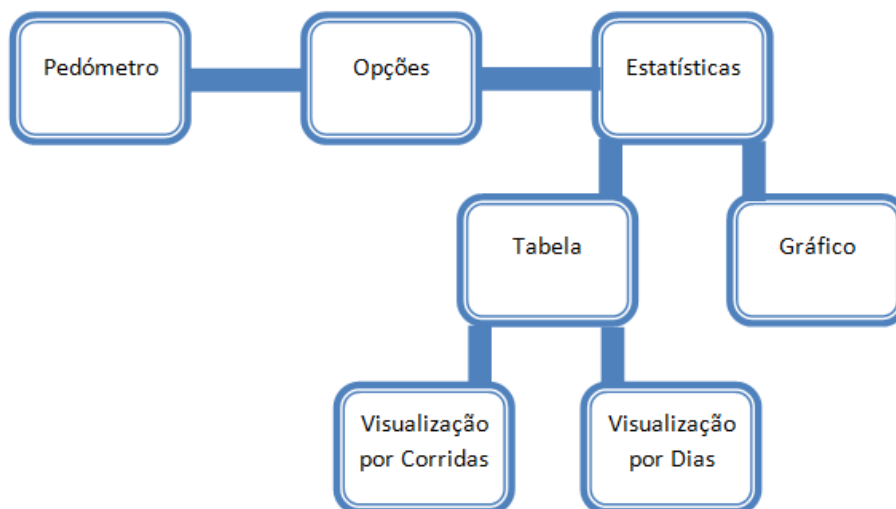


Figura 67 Estrutura da interface gráfica.

6.3.1. LAYOUT DA APLICAÇÃO “PEDÓMETRO ISEP”

O *layout* do “Pedómetro ISEP” foi desenhado de modo a se parecer, tanto quanto possível, com aquele que se iria ter se a plataforma de destino fosse um telemóvel ou PDA. A aplicação também se pretendia simples, mas que disponibiliza-se toda a informação relevante do exercício do utilizador.

O separador “Pedómetro” (Figura 68) é o principal painel de interacção com o utilizador e contém:

1. Número de passos (da perna que usa o sensor) efectuados no exercício em curso;
2. Distância percorrida no exercício (em metros);
3. Velocidade instantânea do exercício (em km/h);
4. Calorias consumidas durante o exercício (em kcal);
5. Velocidade média do exercício (em km/h);
6. Duração do exercício (horas, minutos, segundos, décimos de segundo);
7. Botão de início/pausa do exercício;
8. Botão de fim/reinício do exercício;
9. Indicação do progresso do exercício.

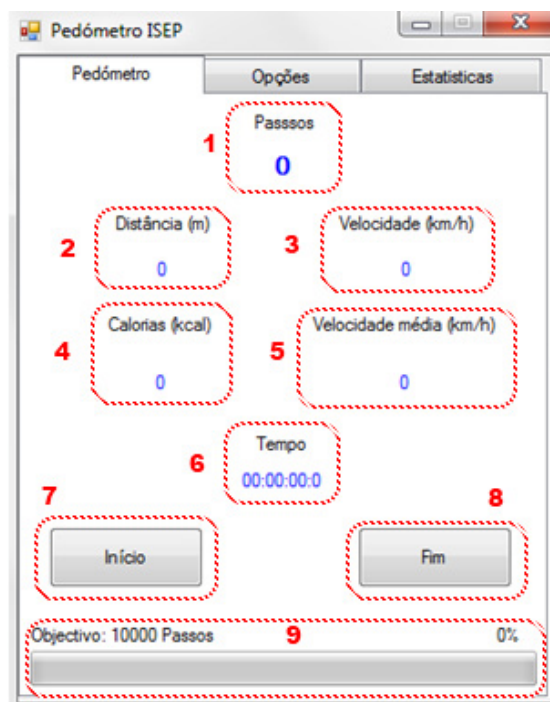


Figura 68 Separador “Pedómetro”.

O separador “Opções” (Figura 69) é a zona de configuração do pedómetro, e contém:

1. Uma caixa para selecção da porta COM a utilizar;
2. Uma caixa de texto para inserir o peso do utilizador (em kg);
3. Um caixa de texto para inserir a altura do utilizador (em cm);
4. Uma caixa para selecção do método de determinação do comprimento da passada (“Automático ou Manual”);
5. Uma caixa de texto para introdução do comprimento da passada quando se caminha (só necessário se o método escolhido for “Manual”);
6. Uma caixa de texto para introdução do comprimento da passada quando se corre (só necessário se o método escolhido for “Manual”);
7. Um botão para conectar/desconectar a porta COM escolhida;
8. Um botão de *reset* para apagar todos os registos efectuados;
9. Uma caixa para selecção do objectivo do exercício (nº de passos, distância a percorrer, tempo de exercício e calorias a despende).

Figura 69 Separador “Opções”.

O separador “Estatísticas” (Figura 70) inclui mais dois separadores: “Tabela” e “Gráfico”. Estes dois separadores permitem ao utilizador duas opções de visualização do histórico dos exercícios efectuados.

Quando está seleccionado o separador “Tabela” é possível:

1. Verificar numa tabela os dados resultantes de todas as corridas efectuadas;
2. Verificar numa tabela o progresso diário;
3. Apagar um registo da tabela;
4. Verificar o somatório dos dados, resultante de todas as corridas efectuadas (“Resumo”).

Data	Tempo	Passos	Metros	Calorias
05-08-2...	00:00:19	27	20	12
05-08-2...	00:00:17	20	16	10
15-09-2...	00:02:39	59	52	32
23-09-2...	00:01:07	32	26	5

Tempo	Passos	Distância	Calorias
00:04:22	138	114	59

Figura 70 Separador “Estatísticas”.

Se o separador seleccionado for o “Gráfico” (Figura 71), é disponibilizado ao utilizador a possibilidade seleccionar a representação de um gráfico para avaliação do progresso. O período de avaliação do gráfico pode ser: diário, semanal ou mensal. A informação a representar pode ser: o número de passos efectuados, a distância percorrida, o tempo da corrida, ou as calorias consumidas.

Para desenhar o gráfico pretendido o utilizador deve: escolher uma data (3), escolher uma opção (1), escolher um período de avaliação (2) e por fim carregar no botão desenhar (4). Se o período de avaliação escolhido for semanal ou mensal, os valores representados serão referentes a semana ou ao mês da data escolhida.

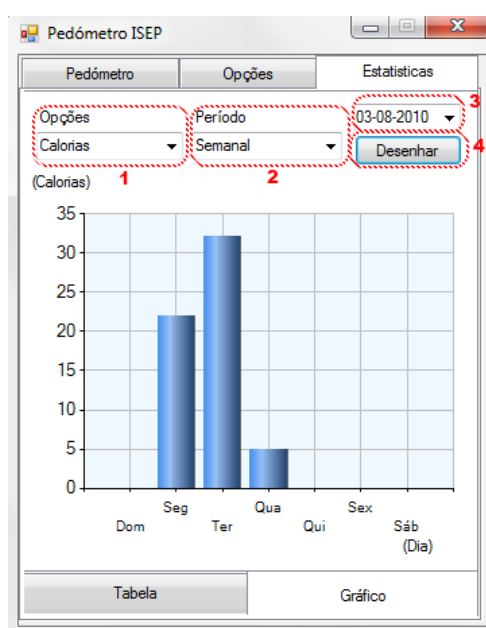


Figura 71 Separador “Gráfico”

6.3.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO “PEDÓMETRO ISEP”

Quando a aplicação é iniciada e a “Form1” é carregada vai ser:

- Configurada a porta série – Com *BaudRate* de 115200 bps, sem paridade, 8 bits de dados e 1 *stop bit*;
- Criado dois ficheiros XML, se estes não existirem – cada ficheiro XML guarda uma das tabelas de dados (registo por corridas ou registo por dia);
- Criado um ficheiro de texto que guarda a configuração do pedómetro (peso, altura, comprimento da passada e os valores do “Resumo”);
- Efectuada a leitura dos ficheiros e o preenchimento dos campos respectivos, caso os ficheiros existam.

Depois do utilizador seleccionar a porta COM e carregar no botão “Conectar”, vai esperar que o prototipo estabeleça a conexão Bluetooth. Quando a comunicação estiver estabelecida o utilizador pode carregar no botão “Início”, dando assim início a contagem de passos.

O botão “Início” serve também para pausar o programa. Logo, quando se carrega no botão é verificado o estado do programa (verifica se os *Timers* usados estão activos), e perante o esse estado é enviado para a porta série o comando respectivo. Os comandos são:

- O carácter “I” – para iniciar;
- O carácter “S” – para pausar;
- O carácter “R” – para retomar a partir da pausa;
- O carácter “F” – para finalizar.

Tendo em atenção que antes de enviar o comando para iniciar ou retomar, é enviado um carácter (0x00) para acordar o microcontrolador.

Assim que a porta série receber valores vai ocorrer um evento que:

- Vai ler os 6 bytes da porta série (carácter “A”, 4 bytes do número total de passos e 1 bytes do número de passos em dois segundos);
- Vai guardar em variáveis os valores recebidos;
- Vai efectuar o cálculo da distância, velocidade e calorias consumidas, de acordo com as fórmulas apresentadas na secção 4.3.

O programa utiliza dois *Timers*. O Timer1 é usado para actualizar, a cada 500 ms, os valores (passos, distância, velocidade, calorias e velocidade média) na interface gráfica. Enquanto o Timer2 é utilizado para criar o cronómetro e actualizar a barra de progresso consoante o objectivo escolhido.

Assim que o utilizador acaba o seu exercício carrega no botão “Fim”, que vai originar o aparecimento de uma caixa de mensagem. Esta caixa de mensagem apresenta três opções de escolha: guardar os dados relativos ao exercício realizado, não guardar, ou cancelar e continuar o exercício. Se a opção for a de guardar são executadas as seguintes acções:

- Os *timers* são parados;
- É enviado para a porta série o comando de fim;

- Os valores são guardados nas duas tabelas criadas para o efeito e apresentados no separador “Tabela”;
- É actualizada a área de “Resumo”;
- As *labels* do separador “Pedómetro” são limpas.

Se a opção for a de não guardar, é enviado para a porta série o comando de fim e as *labels* do separador “Pedómetro” são limpas.

No separador “Gráfico”, quando o utilizador pretender desenhar um gráfico em que o período a avaliar é de um dia específico, é feita uma pesquisa dos parâmetros na tabela que guarda os valores de todas as corridas. Se o período a avaliar for de uma semana ou mês, a pesquisa é feita na tabela que guarda o resumo dos valores diários.

No momento em que a interface é fechada pelo utilizador as configurações e os valores do resumo são guardados no ficheiro de texto, enquanto as duas tabelas são guardadas no ficheiro XML respectivo.

7. TESTES REALIZADOS

Durante o desenvolvimento do protótipo foi necessário efectuar vários testes, sejam eles para compreensão do funcionamento das partes do sistema ou para optimização do mesmo. Neste Capítulo serão descritos os testes mais importantes, bem como os resultados obtidos.

7.1. REDE BLUETOOTH

De modo a compreender o funcionamento do LMX9838 e verificar a comunicação entre módulos Bluetooth, foi montado o sistema ilustrado na Figura 72.

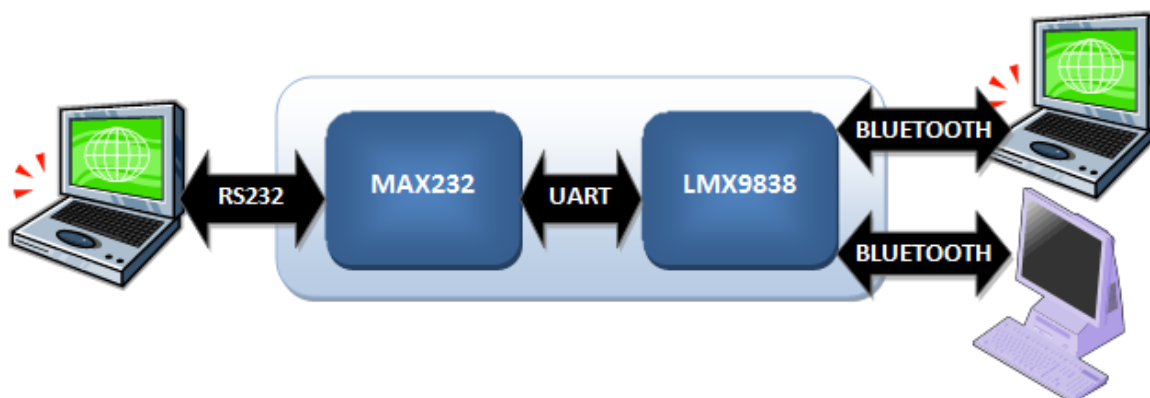
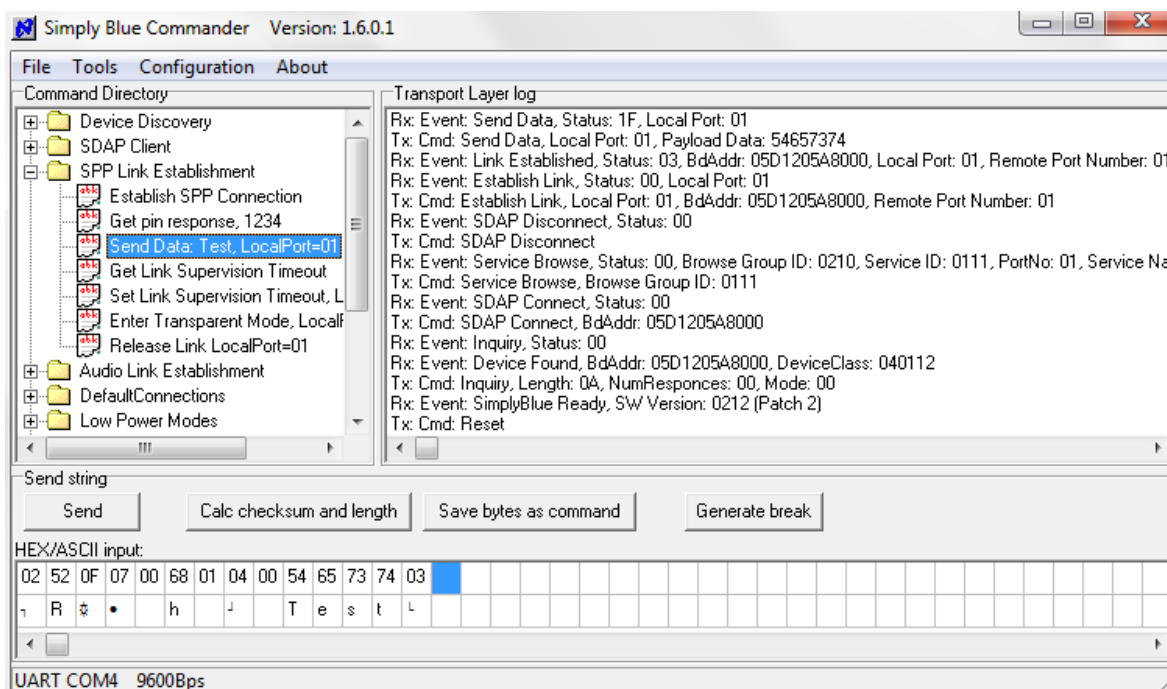


Figura 72 Sistema para teste da comunicação Bluetooth.

O sistema consiste em controlar o LMX9838 através da aplicação para PC Simply Blue Commander (disponibilizada gratuitamente pela National Semiconductor). Para o fazer é

necessário usar um MAX232 para converter os níveis de tensão entre o módulo Bluetooth e o PC que o vai controlar.



Assim, com o uso da aplicação foi possível estabelecer uma ligação Bluetooth entre dois dispositivos e simular a comunicação que ocorrerá aquando o uso do módulo no pedómetro. Esta simulação permitiu, acima de tudo, verificar a reposta do outro dispositivo Bluetooth e tirar ilações para o desenvolvimento do código para o microcontrolador.

estabelecidas a partir do PC. Esta configuração pode ser feita nas “Definições Bluetooth”, no separado “Portas COM”, acessível a partir do ícone da “Área de Notificação”.

Depois da simulação de uma ligação simples, passou-se para criação de uma rede do tipo *piconet* (estrela). Nesta simulação de uma rede, o LMX9838 assumiu novamente a função de *master*, enquanto, o portátil e um PC de secretária, a função de *slave*. O PC de secretária usou um adaptador USB-Bluetooth, e como pilha Bluetooth usou a BlueSoleil da IVT Corporation (Figura 74). Sendo a pilha BlueSoleil, mais versátil, com um maior suporte de perfis e uma interface mais intuitiva, do que a do Windows.

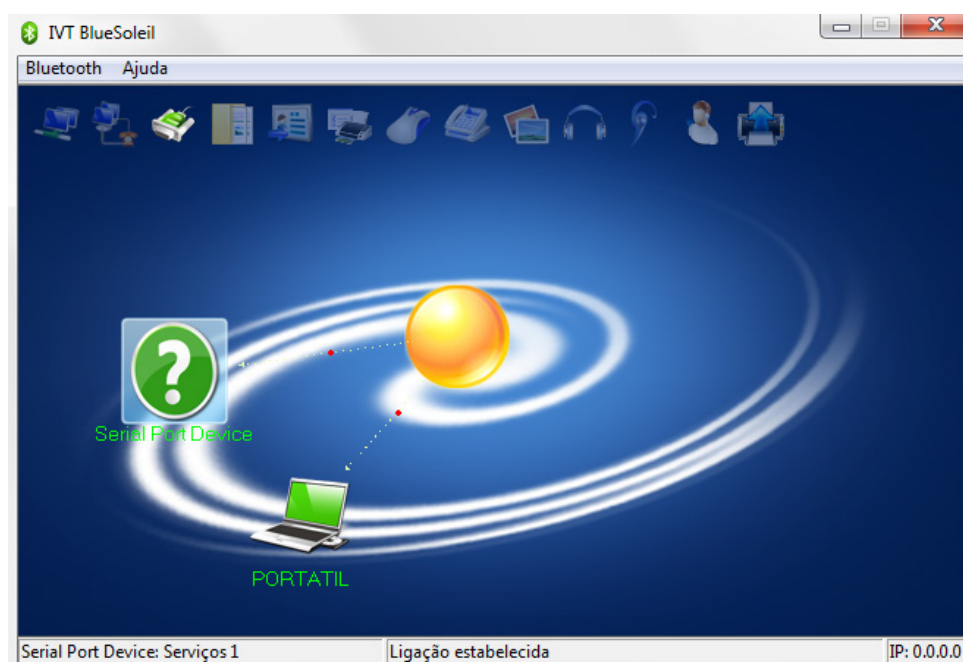


Figura 74 Interface da pilha BlueSoleil.

Recorrendo novamente ao Simply Blue Commander, estabeleceu-se a *piconet* entre os três dispositivos e verificou-se a comunicação entre eles. Tendo-se constatado que para cada ligação SPP é necessário indicar um porto local diferente, que estará associado a um dispositivo remoto. Assim, sempre que se pretende enviar dados para um determinado dispositivo basta indicar no comando “SPP_Send_Data” o respectivo porto local. Com isto, pretendeu-se simular o processo de comunicação que seria necessário estabelecer se o pedómetro fosse constituído por mais do que um módulo sem fios.

7.2. VERIFICAÇÃO DA ACELERAÇÃO DURANTE A MARCHA

De modo a desenvolver um algoritmo de detecção de passo eficaz e determinar qual é o melhor local para a colocação do acelerómetro, é necessário conhecer o comportamento da

aceleração durante a marcha. O método usado passou por desenvolver um programa para o microcontrolador para efectuar a leitura dos valores do acelerómetro e os transmitir por Bluetooth. Este programa efectua a leitura dos seis registos do acelerómetro, que contêm as componentes da aceleração, converte-os em seis caracteres ASCII e envia-os para a USART.

Para analisar as componentes (x, y e z) da aceleração foi desenvolvida uma aplicação em Visual Basic, que recebe os valores enviados e desenha um gráfico representativo desses valores. A aplicação tem o seguinte princípio de funcionamento:

- Espera que ocorra um evento de recepção de dados na porta série;
- Efectua a leitura de seis caracteres ASCII, representativos dos valores em bruto (sem processamento) das três componentes da aceleração;
- Converte os caracteres para três inteiros;
- Calcula a aceleração composta (equação 10);
- Calcula um limite (*threshold*) da aceleração composta, a cada 50 amostras (equação 12);
- Guarda os valores em listas para poder desenhar gráficos do tipo série.
- Apresenta numa interface a opção para desenhar o gráfico pretendido (aceleração em x, y e z, a aceleração composta, e a *threshold*).

No primeiro teste o protótipo foi colocado no peito do pé e foi reproduzido o caminhar a um ritmo normal. Na Figura 76 está ilustrada as componentes da aceleração durante esse teste, com a orientação representada na Figura 75.

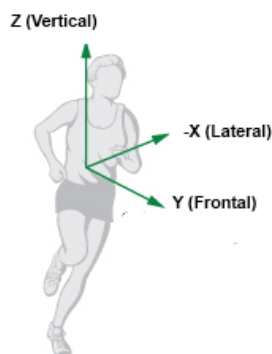


Figura 75 Orientação dos eixos quando o protótipo é colocado no pé (adaptado de [67]).

As linhas do gráfico da Figura 76 têm a seguinte correspondência:

- O valor de “X” representa a aceleração lateral;
- O valor de “Y” representa a aceleração frontal;

- O valor de “Z” representa a aceleração vertical;
- A variação da aceleração de 5461 equivale a variação de 1 g;
- As amostras foram obtidas em intervalos de 50 ms.

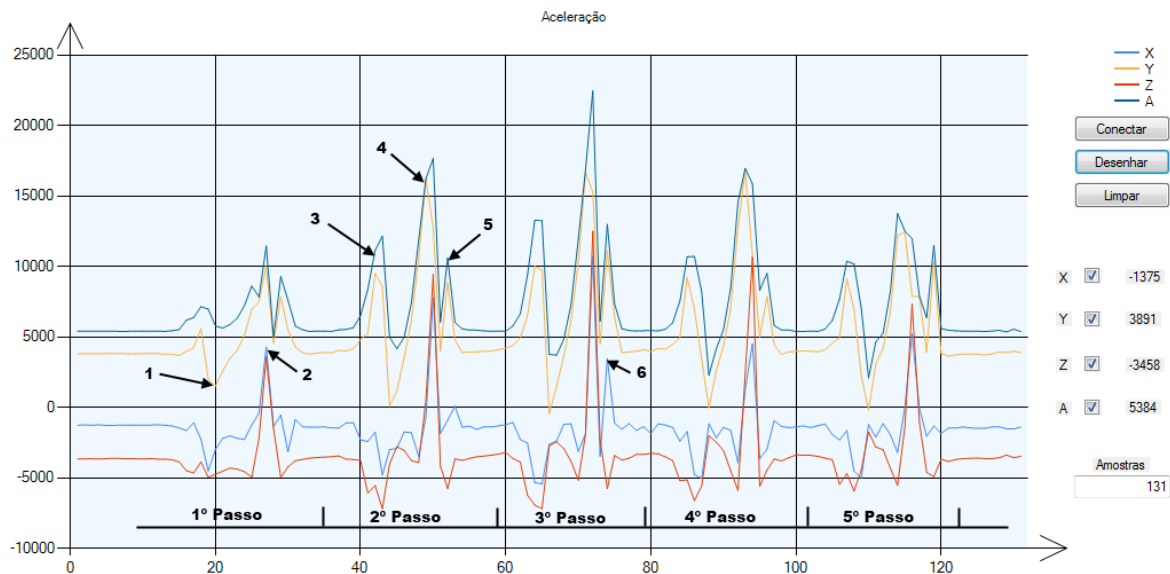


Figura 76 Aceleração quando o protótipo está colocado no pé (caminhar).

Da análise da Figura 76 verifica-se que a aceleração composta varia, aproximadamente, em torno da aceleração gravítica (1 g) e que praticamente assume o comportamento da componente dos “Y”. Verifica-se também que nos cinco passos representados, existe:

1. Elevação do calcanhar;
2. Deslocação do pé para a frente;
3. Fase intermédia de apoio (balanço antes de levantar o calcanhar);
4. Desaceleração vertical depois da elevação dos dedos dos pés e início da elevação da perna;
5. Contacto do calcanhar no solo;
6. Aceleração lateral.

No segundo teste pretendia-se verificar as componentes da aceleração num ritmo de corrida. Assim, o protótipo permaneceu no peito do pé e foi registado os valores da aceleração, que estão ilustrados na Figura 77.

Neste teste a corrida foi efectuada a um ritmo de *jogging*, não muito rápido. Verifica-se um comportamento idêntico ao caminhar, mas em que os valores da aceleração são mais elevados e existe uma maior influência da aceleração lateral na aceleração composta.

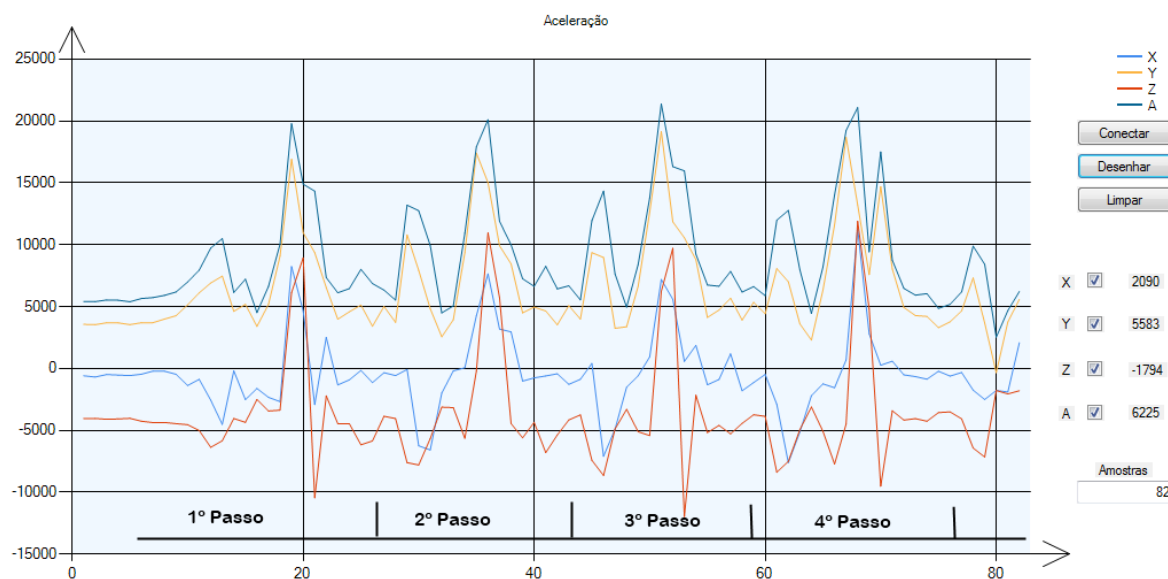


Figura 77 Aceleração quando o protótipo está colocado no pé (correr).

Noutra experiência procurou-se mudar a localização do protótipo e verificar se os valores da aceleração obtidos seriam melhores para a detecção do passo. O local testado para colocação do protótipo foi na perna, junto ao tornozelo. Os valores obtidos estão ilustrados na Figura 78.

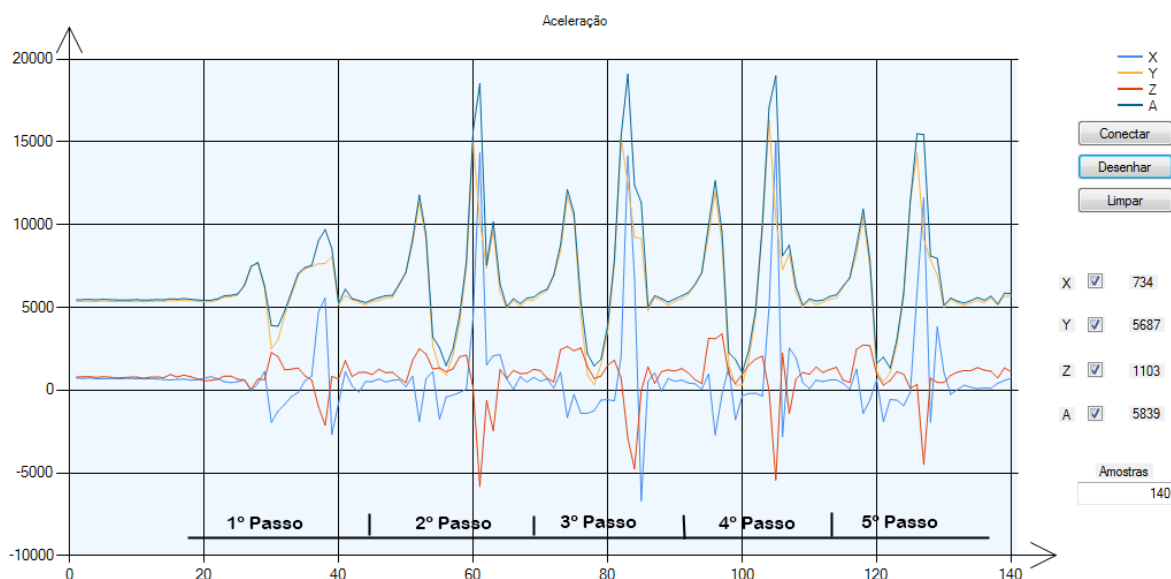


Figura 78 Aceleração quando o protótipo está colocado na perna.

Da análise Figura 78 conclui-se que comportamento é semelhante aos dois gráficos anteriores. No entanto, a aceleração frontal passa a ser representada no eixo dos “X” e a lateral nos “Z” e a variação da aceleração frontal é maior.

Por fim, foi testada mais uma opção para a colocação do protótipo, na anca. Os valores obtidos estão representados na Figura 79.

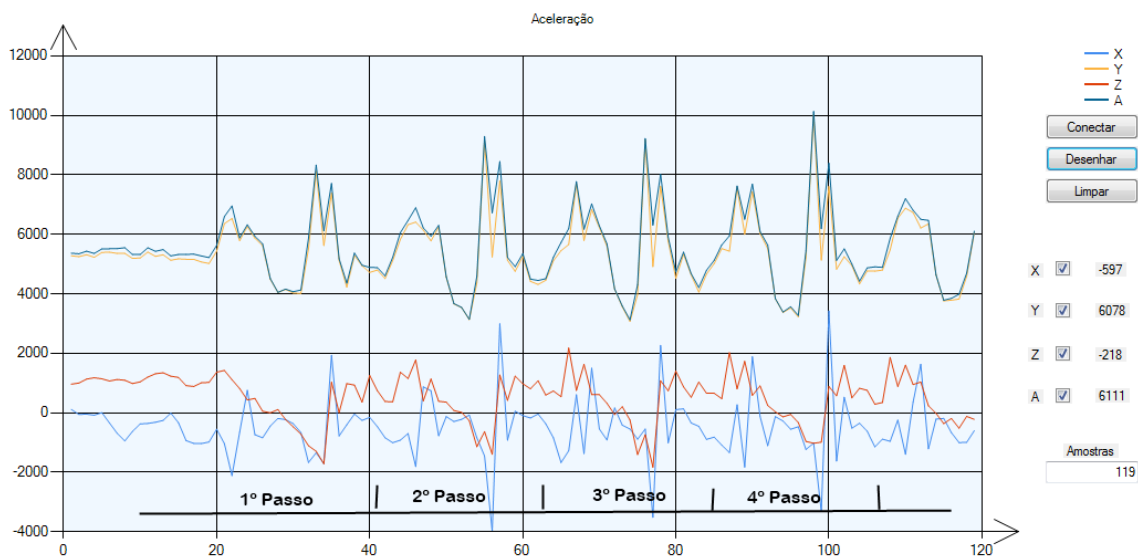


Figura 79 Aceleração quando o protótipo está colocado na anca.

Como se pode ver na Figura 79, a variação da aceleração não é tão expressiva e uniforme como a apresentada no pé ou na perna. O que leva a uma maior possibilidade de erro na detecção de passo. Tendo isto em conta, a anca foi abandonada como uma posição indicada para colocar o protótipo.

No decorrer da elaboração dos algoritmos foi feito vários testes com o protótipo colocado no pé ou na perna. Na sequência desses testes acabou-se por escolher a perna como a zona indicada para a colocação do protótipo, e assim otimizar o algoritmo para essa posição. Esta escolha deve-se ao facto de a variação da aceleração no pé e na perna serem parecidas (deferindo na orientação do eixos), no entanto na perna é mais fácil a colocação e fixação do protótipo. A posição indicada está ilustrada na Figura 80.

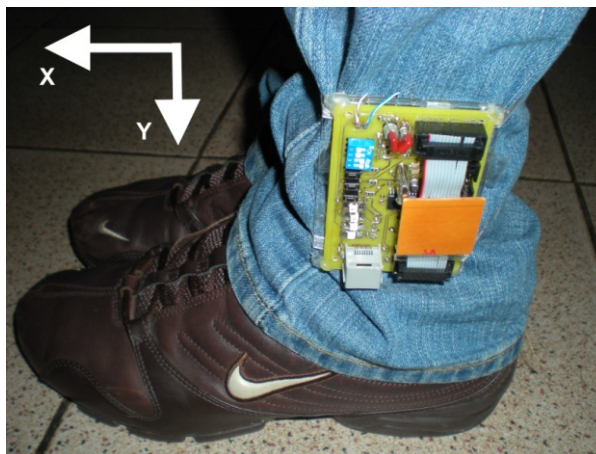


Figura 80 Posição indicada para colocação do protótipo.

7.3. CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia foi um aspecto que se teve sempre em consideração, durante a escolha dos componentes e durante o desenvolvimento do programa para o microcontrolador. Contudo, como o protótipo desenvolvido têm como finalidade efectuar vários testes, foram inseridos quatro *leds*, que não são essenciais ao funcionamento do sistema, mas que consomem aproximadamente 10 mA quando activos.

Na Tabela 14 está exposto os diversos valores do consumo de energia, perante algumas das fases do funcionamento do protótipo. Os valores apresentados foram obtidos enquanto o microcontrolador funcionava com o oscilador interno, a uma frequência de 8 MHz e o *Baudrate* da interface UART de 115200 bps. Há que ter também em consideração que quando o microcontrolador está em *Idle* o CPU está desligado, mas o periféricos estão activos e a funcionar à frequência de 31 kHz, fornecida pelo RTC (*Real-Time Clock*) interno.

Tabela 14 Consumo de energia do protótipo.

Situação de funcionamento	Consumo de corrente
Consumo do TPS63031 (sem carga)	~8,5 mA
Consumo do sistema em funcionamento sem a conexão do módulo LMX9838	~8,8 mA
Consumo durante o estabelecimento da ligação Bluetooth	~45 mA
Consumo total do sistema quando em funcionamento contínuo	~25 mA
Consumo do sistema quando em <i>Idle</i>	~20 mA

Perante os valores obtidos, destaca-se um consumo de energia de 8,5 mA do TPS63031 quando não existe carga. Isto é, a bateria vai continuar a ser drenada mesmo que o circuito não esteja ligado. Este consumo de energia, segundo o fabricante, pode ser reduzido se o pino PS/SYNC do TPS63031 for colocado a massa, activando assim o modo “*Power Save*”.

O consumo de energia mais elevado ocorre durante o estabelecimento da ligação Bluetooth, reduzindo bastante depois de conectado. Verifica-se também que o consumo do microcontrolador é insignificante em relação ao consumo total do protótipo.

7.4. RESULTADOS

A verificação da eficácia do algoritmo teve as seguintes limitações:

- A actividade física teve ser executada a uma distância máxima do computador portátil de 10 m, devido ao alcance máximo do módulo Bluetooth usado;
- A actividade física foi executada sempre pela mesma pessoa, a mesma para o qual o algoritmo foi projectado;
- O algoritmo detecta os passos que são realizados com a perna em que está colocado o protótipo. Sendo o número de passos total, aproximadamente o dobro.

Na Tabela 15 pode-se verificar os resultados obtidos na contabilização de passos com os dois algoritmos desenvolvidos.

Tabela 15 Resultados obtidos na contabilização de passos.

Algoritmo da Aceleração Composta		
Tipo de actividade física	Passos efectuados (1 perna)	Passos contabilizados
Caminhar a ritmo normal	100	124
Correr a ritmo lento (~6 km/h)	100	84
Algoritmo da Aceleração Simples		
Tipo de actividade física	Passos efectuados (1 perna)	Passos contabilizados
Caminhar a ritmo normal	100	99
Correr a ritmo lento (~ 6 km/h)	100	102

Dos resultados obtidos destaca-se a reduzida eficácia do primeiro algoritmo, que deve-se, em parte, ao facto de o exercício ser efectuado em elipses curtas. Isto é, no momento em que a pessoa que está a correr inicia uma curva mais acentuada, a *threshold* (limite utilizado para validação do passo) vai estar a um nível elevado e sendo a aceleração mais reduzida na curva o passo não vai ser contabilizado. Como houve uma necessidade ponderar a calibração (ajuste do valor que se soma ou subtrai a *threshold*) do algoritmo, de modo a que o passo tanto fosse detectado em passos lentos (reduzida variação da aceleração) ou em passos rápidos (elevada variação da aceleração), na situação em que a pessoa está a caminhar irão existir variações da velocidade que serão contabilizadas como passos.

No segundo algoritmo como não há o uso de uma *threshold* e é utilizado duas componentes diferentes da aceleração para validar o passo, a margem de erro vai ser mais

reduzida. No entanto, este algoritmo está ajustado para o caminhar de uma pessoa, o que não garante que a mesma eficácia se verifique se o protótipo for utilizado por uma pessoa com forma de caminhar diferente. Os valores que se usam para verificar a ocorrência de máximos e mínimos da aceleração terão de ser ponderados, de modo a abranger diversos estilos do caminhar das pessoas.

Contudo, toda esta contabilização errada de passos podia ser reduzida ou eliminada com o uso dos sensores de pressão. Conciliando a verificação do momento em que o pé entra e deixa de estar contacto com chão, com o uso de um dos algoritmos desenvolvidos, podia-se obter melhores resultados. Com os sensores de pressão também é possível reduzir susceptibilidade para contabilizar passos quando a pessoa se mexe mas não executa o passo.

Durante estes testes também se constatou que a fixação e colocação do protótipo são factores bastante importantes para a obtenção de um bom resultado.

No que diz respeito a determinação da distância percorrida o cálculo é igual para os dois algoritmos, visto utilizar o método explicado na secção 4.3.1 e ser feito na aplicação "Pedómetro ISEP". O método usado utiliza uma relação entre a velocidade e a altura da pessoa para determinar o comprimento da passada. Assim, com uma pessoa de 175 cm de altura obteve-se os resultados da Tabela 16. Os testes foram realizados em linha recta num percurso de aproximadamente 6 m, em que se utilizou o algoritmo da aceleração simples para determinar o passo.

Tabela 16 Resultados obtidos na determinação da distância percorrida.

Algoritmo da Aceleração Simples				
Tipo de actividade física	Passos efectuados (1 perna)	Passos contabilizados	Distância percorrida	Distância contabilizada
Caminhar a ritmo normal	5	5	~6 m	4,2 m
Correr a ritmo lento (~6 km/h)	4	4	~ 6 m	3,5 m

Os testes efectuados são pouco conclusivos quanto a eficácia do método utilizado, isto porque a distância percorrida é reduzida. Com a pouca distância percorrida a fase de aceleração e de desaceleração da pessoa vai ter bastante influência na determinação do número de passos que ocorreram em dois segundos, o que leva a um cálculo pouco preciso

do comprimento da passada. Apesar dos valores obtidos apresentarem alguma discrepância em relação ao valor efectivo, este método continua a ser valido para distâncias longas e sobretudo para percursos em que exista grande variação da velocidade. Numa situação em que a velocidade da pessoa é constante durante um longo período de tempo, pode-se usar a opção de introdução manual do comprimento da passada na aplicação “Pedómetro ISEP”. Com a utilização da opção “Manual”, para determinar o comprimento da passada, pode-se conseguir um cálculo muito mais preciso da distância percorrida, quando a variação do ritmo de corrida é reduzida.

8. CONCLUSÕES

O pedómetro é um equipamento cada vez mais utilizado por pessoas que pretendem levar um estilo de vida activo e saudável. Com a maior procura de equipamentos com estas características vão surgindo no mercado soluções com maiores funcionalidades e com melhor capacidade para avaliar a actividade física. Contudo, alguns dos equipamentos apresentam a desvantagem de não ser suficientemente precisos ou restringirem a plataforma que suporta a interface com o utilizador. Este trabalho pretende colmatar essas falhas, recorrendo a combinação de dois tipos diferentes de sensores (acelerómetro e de pressão) e utilizar um protocolo de comunicação que está presente na maioria dos telemóveis.

Durante a elaboração desta tese foi necessário adquirir conhecimentos sobre os conceitos biomecânicos da marcha humana, entender o princípio funcionamento do protocolo de comunicação Bluetooth e aprender a programar numa linguagem orientada a objectos. Projectou-se um sistema de raiz, em que era imperativo a sua reduzida dimensão. Foi necessário projectar uma fonte de alimentação que fornecesse uma tensão estável com o uso de baterias de tipos diferentes. Foram desenvolvidas duas aplicações em Visual Basic, uma para visualizar as componentes da aceleração, e a aplicação “Pedómetro ISEP” para controlar o sistema, visualizar todos os parâmetros relevantes da actividade física e visualizar o progresso.

Para o desenvolvimento do protótipo foi escolhido um microcontrolador recente (PIC18F25J50), que apresenta como argumento principal o reduzido consumo de energia. Esta escolha verificou-se acertada, visto que, o consumo do microcontrolador é pouco significativo em relação ao consumo global do sistema e é um microcontrolador que, devido aos vários periféricos, permite uma elevada flexibilidade num futuro desenvolvimento.

Ainda no que diz respeito ao consumo de energia, verificou-se que o módulo Bluetooth usado (LMX9838) apresenta um elevado consumo, para um sistema em que é pretendido que a bateria seja de reduzidas dimensões e dure bastante tempo. No entanto, é um módulo perfeitamente funcional e que permite uma integração fácil no sistema.

Contudo, salvaguarda-se que o protótipo ainda necessita de mais testes, no que diz respeito experimentação com um maior número de pessoas, de modo a que a precisão seja garantida para vários utilizadores. Para que esta experimentação seja bem sucedida o sistema deve interagir com uma unidade móvel, só conseguido quando a plataforma for um telemóvel ou PDA. Os dois algoritmos desenvolvidos foram duas abordagens diferentes ao problema, porém, o tempo limitado para o desenvolvimento deste projecto não possibilitou que outras possibilidades fossem testadas.

Apesar de não se ter conseguido obter os sensores de pressão, a sua experimentação é importante, quanto mais não seja para verificar se os benefícios obtidos justificam a sua integração no sistema. Teoricamente a sua utilização poderá resolver grande parte das contabilizações erradas de passos e aumentar a precisão do sistema.

Verificou-se também que a fixação e local de colocação do protótipo são factores bastante importantes para que o sistema apresente bons resultados. Uma má fixação do protótipo que só usa o acelerómetro vai originar que ele oscile e contabilize passos extra.

8.1. TRABALHO FUTURO

No que diz respeito a perspectivas de trabalho futuro, este sistema pode ser aperfeiçoado com as seguintes ideias:

- Inserir no sistema os sensores de pressão e verificar a sua validade;

- Obter um telemóvel ou PDA que suporte o perfil SPP e desenvolver a aplicação para o seu sistema operativo. Tornando assim o sistema “móvel” e permitindo a realização de testes mais exaustivos;
- Miniaturizar o protótipo – a dimensão do protótipo ainda pode ser reduzida, sobretudo se o módulo Bluetooth for soldado no mesmo PCB. A reduzida dimensão facilita bastante os testes e a colocação. Uma boa opção seria a colocação do protótipo numa braçadeira de velcro de modo a permitir uma fácil colocação na perna;
- Utilizar módulos Bluetooth *low energy* para criar uma rede de sensores, em que, por exemplo, se podia interligar com outros trabalhos em realização no ISEP, tornar os sensores de pressão *wireless*, ou adicionar um acelerómetro na outra perna. Para gerir o tráfego da rede introduzir um sistema operativo de tempo real no microcontrolador, de modo a tirar partido do conceito de mensagens e tarefas;
- Utilizar o GPS (*Global Positioning System*) do telemóvel para otimizar a aplicação, de modo a que seja possível definir percursos de treino, e melhorar o cálculo da distância percorrida e da velocidade.

Referências Documentais

- [1] Omron – *Omron Pedometer HJ 112 & HJ 720ITC*, Fevereiro 2010, <http://omron-pedometer.com/>
- [2] AGGARWAL, Varun – *Power-Saving Pedometer Measures Speed*, Fevereiro 2010, http://web.mit.edu/varun_ag/www/pedometer2004.pdf
- [3] Pedometer Reviews – *How does a Pedometer Work*, Fevereiro 2010, <http://www.pedometer-review.com/about-pedometer/how-does-a-pedometer-work.htm>
- [4] Wikipedia – *Pedometer*, Fevereiro 2010, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pedometer>
- [5] KEMPER, Han C. G.; VERSCHUUR, Robbert – *Validity and Reliability of Pedometers in Habitual Activity Research*, Laboratory for Psychophysiology and Coronel Laboratory, University of Amsterdam, Jan Swammerdam Instituut, 1 e C. Huygensstraat 20, Amsterdam, The Netherlands, Springer-Verlag, 1977.
- [6] Adidas – *miCoach Pacer User Manual*, Fevereiro 2010, http://www.adidas.com/us/micoach/Multimedia/com/PDF/miCoach_Pacer_User_Manual.pdf
- [7] MOODY, A.G., LIVESTRONG.COM – *Who First Invented the Pedometer?*, Fevereiro 2010, <http://www.livestrong.com/article/16166-first-invented-pedometer/>
- [8] ALAM, Shah, Buzzle.com, *Pedometers – History and Uses*, Fevereiro 2010, <http://www.buzzle.com/articles/pedometers-history-and-uses.html>
- [9] AccuSTEP10000.org – *What is 10,000 Steps?*, Fevereiro 2010, <http://www.accustep10000.org/what.htm>
- [10] LABIOD, H.; AFIFI, H; SANTIS, C – *WI-FI_{TM}, BLUETOOTH_{TM}, ZIGBEE_{TM} AND WIMAX_{TM}*, Springer, 2007, ISBN 978-1-4020-5397-9.
- [11] Bluetooth SIG – *About the Bluetooth SIG*, Fevereiro 2010, <http://www.bluetooth.com/English/SIG/Pages/default.aspx>.
- [12] Bluetooth Logo, Fevereiro 2010, Imagem: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/da/Bluetooth.svg/500px-Bluetooth.svg.png>
- [13] Bluetooth SIG – *Core Specification v2.1 + EDR*, Fevereiro 2010, http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Core_Specification_v21_EDR.aspx
- [14] RATHI, Sailesh – *Blue Tooth Protocol Architecture*, 2000, http://www.es2.be/magazine/00q4/2000q4_p028.pdf
- [15] Bluetooth SIG – *Architecture - Radio*, Fevereiro 2010, http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Architecture_Radio.aspx

- [16] Bluetooth SIG – *Architecture - Baseband*, Fevereiro 2010,
http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Architecture__Baseband.asp
- [17] Bluetooth SIG – *BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.0*, 17 December 2009.
- [18] Bluetooth SIG – *Architecture - Link Manager Protocol (LMP)*, Fevereiro 2010,
http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Architecture__Link_Manager_Protocol_LMP.aspx
- [19] Bluetooth SIG – *Architecture - Host Controller Interface (HCI)*, Fevereiro 2010,
http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Architecture__Host_Controller_Interface_HCI.aspx
- [20] Bluetooth SIG – *Architecture - Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)*, Fevereiro 2010,
http://www.bluetooth.com/ENGLISH/TECHNOLOGY/WORKS/Pages/Architecture__Logical_Link_Control_and_Adaptation_Protocol_L2CAP.aspx
- [21] Bluetooth SIG – *Profiles Overview*, Fevereiro 2010,
http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Profiles__Overview.aspx
- [22] Apple Inc – *Nike + iPod User Guide*, 2009
- [23] Wikipedia – *Nike+iPod*, Março 2010,
http://en.wikipedia.org/wiki/Nike%2BiPod#cite_note-1
- [24] Apple Inc – *Nike + iPod Frequently Asked Questions (Technical)*, 4 Junho de 2009,
<http://support.apple.com/kb/HT2293#faq1>
- [25] GadgetGrid – *Omron HJ-112 Digital Premium Pedometer*, Março 2010, Imagem:
<http://www.gadgetgrid.com/2007/09/18/omron-hj-112-digital-premium-pedometer/>
- [26] WILSON, Mark – *Nike+ vs Samsung miCoach: the verdict*, 10 Abril de 2008,
<http://stuff.tv/blogs/sport/archive/2008/04/10/nike-coming-to-iphone-and-ipod-touch.aspx>
- [27] Bluetooth SIG – *Press Realease*, Março 2010,
<http://www.bluetooth.com/English/Press/Pages/PressReleasesDetail.aspx?ID=4>
- [28] Wikipedia – *Bluetooth low energy*, Março 2010,
http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_low_energy
- [29] ANT Wireless – *Tecnologia ANT*, Março 2010,
<http://www.thisisant.com/technology>
- [30] WiMedia Alliance – *Tecnologia UWB*, Março 2010,
<http://www.wimedia.org/en/about/index.asp?id=abt>
- [31] ZigBee Alliance – *Tecnologia ZigBee*, Março 2010, <http://www.zigbee.org/>
- [32] Z-Wave Alliance – *Tecnologia Z-Wave*, Março 2010, <http://www.z-wave.com/modules/ZwaveStart/>
- [33] Bluetooth SIG – *Basics*, Março 2010,
<http://www.bluetooth.com/English/Technology/Pages/Basics.aspx>

- [34] BURATTI, Chiara; CONTI, Andrea, DARDARI Davide; VERDONE Roberto – *An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution*, University of Bologna, Bologna, Italy, 2009, ISSN 1424-8220.
- [35] Dynastream Innovations Inc. – *ANT Message Protocol and Usage*, Março 2010, http://www.thisisant.com/images/Resources/PDF/1204662412_ant%20message%20protocol%20and%20usage.pdf
- [36] FERNANDES, Ivo – *ZigBee*, Março 2010, <http://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/WPAN/Zigbee.html>
- [37] MALAFAYA, Hugo; TOMÁS, Luís; SOUSA, João – *Sensorização sem fios sobre ZigBee e IEEE 802.15.4*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, Março 2010.
- [38] ZigBee Alliance – *ZigBee Home Automation*, Março 2010, <http://www.zigbee.org/Markets/ZigBeeHomeAutomation/ZigBeeHomeAutomationFeatures/tabid/459/Default.aspx>
- [39] VARGAS, Gomes – *Aplicação da Tecnologia Zigbee em Automação Residencial*, Universidade Luterana do Brasil, Brasil, Novembro 2009.
- [40] Bluetooth SIG – *Compare with Other Technologies*, Março 2010, <http://www.bluetooth.com/English/Technology/Works/Pages/Compare.aspx#2>
- [41] LIM, Yoong; BROWN, Ian; KHOO, Joshua – *An Accurate and Robust Gyroscope-Based Pedometer*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.
- [42] COUTO, Rui; PINHO, Sérgio – *Wireless Acquisition and Logging of the Kinematics of Human Gait – WALKinG*, Julho 2005.
- [43] Biomedikal – *Gait Analysis*, Dezembro 2009. <http://kushtripathi.files.wordpress.com/2009/12/gait.jpg>
- [44] MORRIS, Rod – *Exceeding the standard for wireless sensor networks*, Março 2010, http://www.mobilehandsetdesignline.com/206900218?cid=RSSfeed_mobilehandsetdesignline_mhsslRSS
- [45] Tekscan – *FlexiForce Force Sensors*, Abril 2010, <http://www.tekscan.com/flexiforce/flexiforce.html>
- [46] Interlink Electronics – *Force Sensing Resistor (FSR)*, Julho 2010, <http://www.interlinkelectronics.com/Force-Sensing-Resistor>
- [47] Motion Lab Systems – *Event Switches for EMG Systems*, Abril 2010, http://www.motion-labs.com/prod_access_footswitches.html
- [48] Measurement Specialties – *Force Sensor, FX1901 Series*, Abril 2010, http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=2446
- [49] VTI Technologies – *CMA3000 Series Data Sheet*, Abril 2010, http://www.vti.fi/midcom-serveattachmentguid-1df5c00f2c48b705c0011df90f6fbf9599777447744/cma3000_d01_datasheet_827780a.02.pdf

- [50] Analog Devices – *ADXL345 Data Sheet*, Julho 2010,
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
- [51] STMicroelectronics – *LIS3DH Data Sheet*, Julho 2010,
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/17530/lis3dh.pdf>
- [52] STMicroelectronics – *LIS3LV02DL Data Sheet*, Julho 2010,
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/12094/lis3lv02dl.pdf>
- [53] NORDIN, Margareta; FRANKEL, Victor – *Basic Biomechanics Of The Musculoskeletal System*, Third Edition, LIPPINCOIT WILLIAMS & WILKINS, 2001.
- [54] Ideabetes.com – *Foot Inspection and Monofilament Use*, Abril 2010,
<http://www.ideabetes.com/images/products/sugar.foot.doc1.jpg>
- [55] Microchip Technology Inc – *XLP Technology*, Julho 2010,
http://www.microchip.com/en_us/technology/xlp/
- [56] Microchip Technology Inc – *PIC18F2550 Data Sheet*, Julho 2010,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>
- [57] Microchip Technology Inc – *PIC18F25J50 Data Sheet*, Julho 2010,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39931c.pdf>
- [58] National Semiconductor – *LMX9838 Bluetooth® Serial Port Module*, Setembro 2007, <http://www.national.com/ds/LM/LMX9838.pdf>
- [59] STMicroelectronics – *SPBT2532C2.AT Data Sheet*, Julho 2010
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/16089.pdf>
- [60] Bluegiga Technologies – *WT12 - Class 2 Bluetooth® 2.1+ EDR Module*, Julho 2010,
http://www.bluegiga.com/WT12_Class_2_Bluetooth_Module
- [61] Seminews.ru – *LMX9838*, Julho 2010,
<http://www.seminews.ru/images/LMX9838.jpg>
- [62] National Semiconductor – *LMX9838 Software Users Guide*, Março 2008,
<http://www.national.com/an/AN/AN-1699.pdf>
- [63] Craig Aszkler – *The Principles of Acceleration, Shock, and Vibration Sensors*, May 2005, http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/the-principles-acceleration-shock-and-vibration-sensors-574?page_id=4
- [64] Owec.com – *Battery LIR2477*, Julho 2010,
<http://image1.nowec.com/2008/5/24/henghuidc/1/10-10205-2931595.jpg>
- [65] Nokia – *Nokia Battery BL-5C*, Julho 2010, <http://www.nokia.com.my/find-product/accessories/all-accessories/power/batteries/nokia-battery-bl-5c>
- [66] Texas Instruments – *TPS63031 Data Sheet*, Julho 2010,
<http://www.ti.com/lit/gpn/tps63031>
- [67] ZHAO, Neil – *Full-Featured Pedometer Design Realized with 3-Axis Digital Accelerometer*, Analog Devices, China, June 2010,
<http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/44-06/pedometer.pdf>

- [68] BrianMac Sports Coach – *Running Economy*, Agosto 2010,
<http://www.brianmac.co.uk/economy.htm>
- [69] University of South Carolina – *The Compendium of Physical Activities*, Agosto 2010,
<http://prevention.sph.sc.edu/tools/compendium.htm>
- [70] Philips Electronics – *Philips Activa Portable fitness device ACT101M with TempoMusic*, Agosto 2010, <http://www.p4c.philips.com/cgi-bin/dcbint/cpindex.pl?slg=en&scy=us&ctn=ACT101M/17>
- [71] Interlink Electronics – *FSR Force Sensing Resistor Integration Guide and Evaluation Parts Catalog*, Settembre 2010,
<http://www.media.mit.edu/resenv/classes/MAS836/fsrguide.pdf>

Anexo A. Sumário dos pacotes Bluetooth

Neste anexo são reunidos todos os pacotes Bluetooth e as suas características. Na Figura 81 pode-se observar os pacotes de controlo, na Figura 82 os pacotes assíncronos e na Figura 83 os pacotes síncronos. O “Payload” representa o campo *payload* de um pacote, excluindo FEC, CRC e o cabeçalho do *payload*.

Type	Payload (bytes)	FEC	CRC	Symmetric Max. Rate	Asymmetric Max. Rate
ID	na	na	na	na	na
NULL	na	na	na	na	na
POLL	na	na	na	na	na
FHS	18	2/3	yes	na	na

Figura 81 Pacotes de controlo [17].

Type	Payload Header (bytes)	User Payload (bytes)	FEC	CRC	Symmetric Max. Rate (kb/s)	Asymmetric Max. Rate (kb/s)	
						Forward	Reverse
DM1	1	0-17	2/3	yes	108.8	108.8	108.8
DH1	1	0-27	no	yes	172.8	172.8	172.8
DM3	2	0-121	2/3	yes	258.1	387.2	54.4
DH3	2	0-183	no	yes	390.4	585.6	86.4
DM5	2	0-224	2/3	yes	286.7	477.8	36.3
DH5	2	0-339	no	yes	433.9	723.2	57.6
AUX1	1	0-29	no	no	185.6	185.6	185.6
2-DH1	2	0-54	no	yes	345.6	345.6	345.6
2-DH3	2	0-367	no	yes	782.9	1174.4	172.8
2-DH5	2	0-679	no	yes	869.1	1448.5	115.2
3-DH1	2	0-83	no	yes	531.2	531.2	531.2
3-DH3	2	0-552	no	yes	1177.6	1766.4	235.6
3-DH5	2	0-1021	no	yes	1306.9	2178.1	177.1

Figura 82 Pacotes assíncronos [17].

Type	Payload Header (bytes)	User Payload (bytes)	FEC	CRC	Symmetric Max. Rate (kb/s)
HV1	na	10	1/3	no	64.0
HV2	na	20	2/3	no	64.0
HV3	na	30	no	no	64.0
DV ¹	1 D	10+(0-9) D	2/3 D	yes D	64.0+57.6 D
EV3	na	1-30	No	Yes	96
EV4	na	1-120	2/3	Yes	192
EV5	na	1-180	No	Yes	288
2-EV3	na	1-60	No	Yes	192
2-EV5	na	1-360	No	Yes	576
3-EV3	na	1-90	No	Yes	288
3-EV5	na	1-540	No	Yes	864

Figura 83 Pacotes síncronos [17].

Anexo B. Comparativo de redes WPAN

Na Tabela 17 pode-se observar um comparativo das principais características técnicas de algumas redes WPAN.

Tabela 17 Comparativo de redes WPAN

	Bluetooth (IEEE 802.15.1)	Zigbee (IEEE 802.15.4)	ANT	UWB (IEEE 802.15.3)
Disponibilidade	Sim	Sim	Sim	Não
Espectro	2.4 GHz Banda Livre	915 MHz, 868 MHz e 2.4 GHz	2.4 GHz Banda livre	3.1 - 10.6 GHz
Canal	79 canais com 1 MHz cada	-16 canais nos 2.4 GHz com 5 MHz; -10 canais nos 915 MHz com 2 MHz; -1 canal nos 868 MHz.	78 canais com 1 MHz cada	5 canais
Segurança	-V2.0 - Encriptação 64/128-bit; -V4.0 - 128-bit AES com <i>Counter Mode CBC-MAC</i> .	Encriptação de 128-bit	128-bit AES	
Acesso ao meio	TDM com FHSS	DSSS com CSMA/CA	TDMA	DSSS CSMA/CA
Modulação	-V1.0 – GFSK; -V2.0 – DQPSK; -V2.0 + EDR - 8DPSK.	-DQPSK (2.4 GHz); -BPSK (900 MHz).	GFSK	-DQPSK, QPSK 16-QAM, 32-QAM; -BPSK e 4BOK (802.15.3a).
<i>Data-Rate</i>	-V1.2 – 1 Mbps; -V2.0 + EDR – 3 Mbps; -V3.0 + HS – 24 Mbps; -V4.0 – 1 Mbps.	-20 Kbps nos 868 MHz; -40 Kbps nos 915 MHz; -250 Kbps nos 2.4 GHz.	1 Mbps	-11 - 55 Mbps (802.15.3); -55 – 480 Mbps (802.15.3a).
<i>Time to Wake and Transmit</i>	-V2.0 - 3 s; -V4.0 - 3 ms.	15 ms	5.2 ms - 2 s	15 ms
Cobertura	-10 m (10 mW); -100 m (100 mw).	500 m (50 metros típico)	30 m	-70 m; -Até 10 metros (802.15.3a).
QoS	-Voz (<i>connection oriented</i>); Dados (<i>connectionless</i>).	Aplicações de alta ou baixa latência		Aplicações multimédia
Topologias	PP, PMP, <i>Piconet</i> , <i>Scaternet</i>	Estrela, PP e Mesh	PP, estrela, árvore, <i>practical mesh</i>	PP, PMP, <i>Piconet</i>

Aplicações típicas	-V1.0 – v3.0 - Voz e Dados; -V4.0 – Dispositivos de baixa potência e baixa velocidade.	-Dispositivos de baixa potência e baixa velocidade; -Sensores; -Controladores; -Monitorização remota.	Equipamento desportivo e de saúde	-Electrónica de consumo; -Multimédia; -Cabos de Vídeo.
Especificações adicionais	Até 7 <i>slaves</i> por <i>piconet</i>	6555 redes e $1845 \cdot 10^{16}$ dispositivos	65533 nós	-Até 243 dispositivos por <i>piconet</i> ; -10 dispositivos no 802.15.3a

Anexo C. Circuito eléctrico

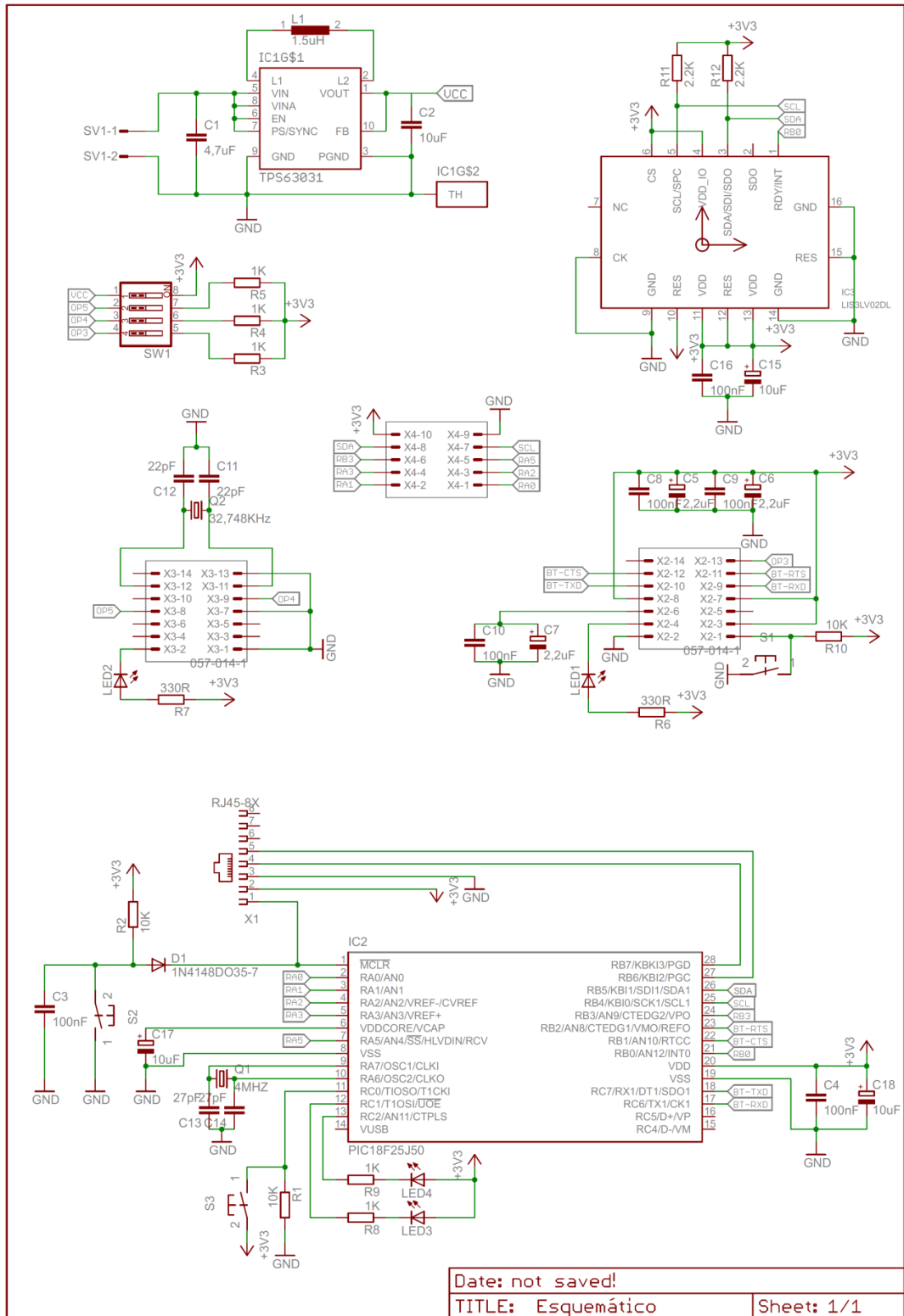


Figura 84 Esquemático do protótipo.

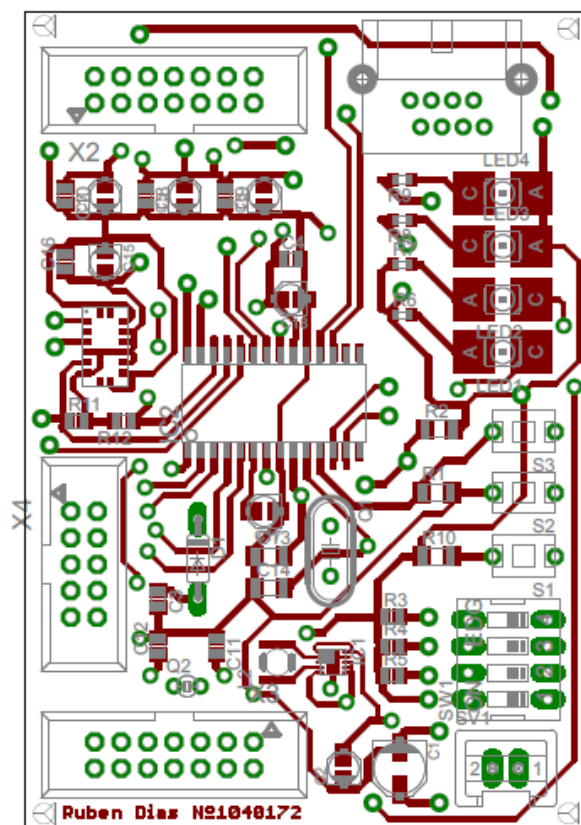


Figura 85 Placa de circuito impresso (por cima).

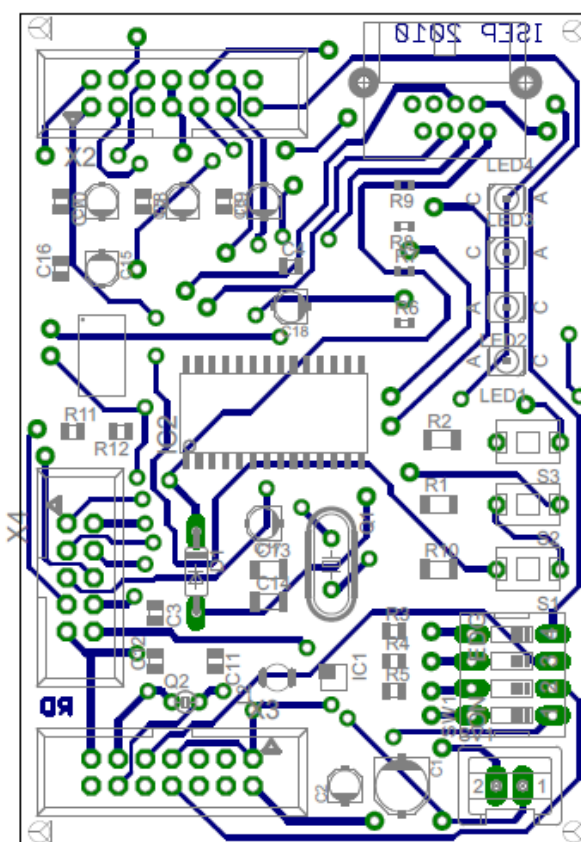


Figura 86 Placa de circuito impresso (por baixo).

Na Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20, está a correspondência dos pinos dos conectores usados.

Tabela 18 Correspondência dos pinos do conector X2.

Conector	BT Pinos	Função
X2-1	2	BT Reset
X2-2	3 e 4	GND
X2-3	6	MVCC
X2-4	7	PG6
X2-5	8	XOSCEN
X2-6	9	VCC_CORE
X2-7	10	VCC
X2-8	11	VCC_IO
X2-9	12	RXD
X2-10	13	TXD
X2-11	14	RTS
X2-12	15	CTS
X2-13	16	OP3
X2-14	NC	NC

Tabela 19 Correspondência dos pinos do conector X3.

Conector	BT Pinos	Função
X3-1	17 e 18	GND
X3-2	19	PG7
X3-3	20	SCLK
X3-4	21	SFS
X3-5	22	STD
X3-6	23	SRD
X3-7	24	GND
X3-8	25	OP5
X3-9	26	OP4
X3-10	27	32K+
X3-11	28	32K-
X3-12	29,30,31 e 32	GND
X3-13	NC	NC
X3-14	NC	NC

Tabela 20 Correspondência dos pinos do conector X4.

Conector	Pinos PIC	Função
X4-1	2	RA0 / AN0
X4-2	3	RA1 / AN1
X4-3	4	RA2 / AN2
X4-4	5	RA3 / AN3
X4-5	7	RA5 / AN4
X4-6	24	RB3
X4-7	25	SCL
X4-8	26	SDA
X4-9	-	GND
X4-10	-	VCC

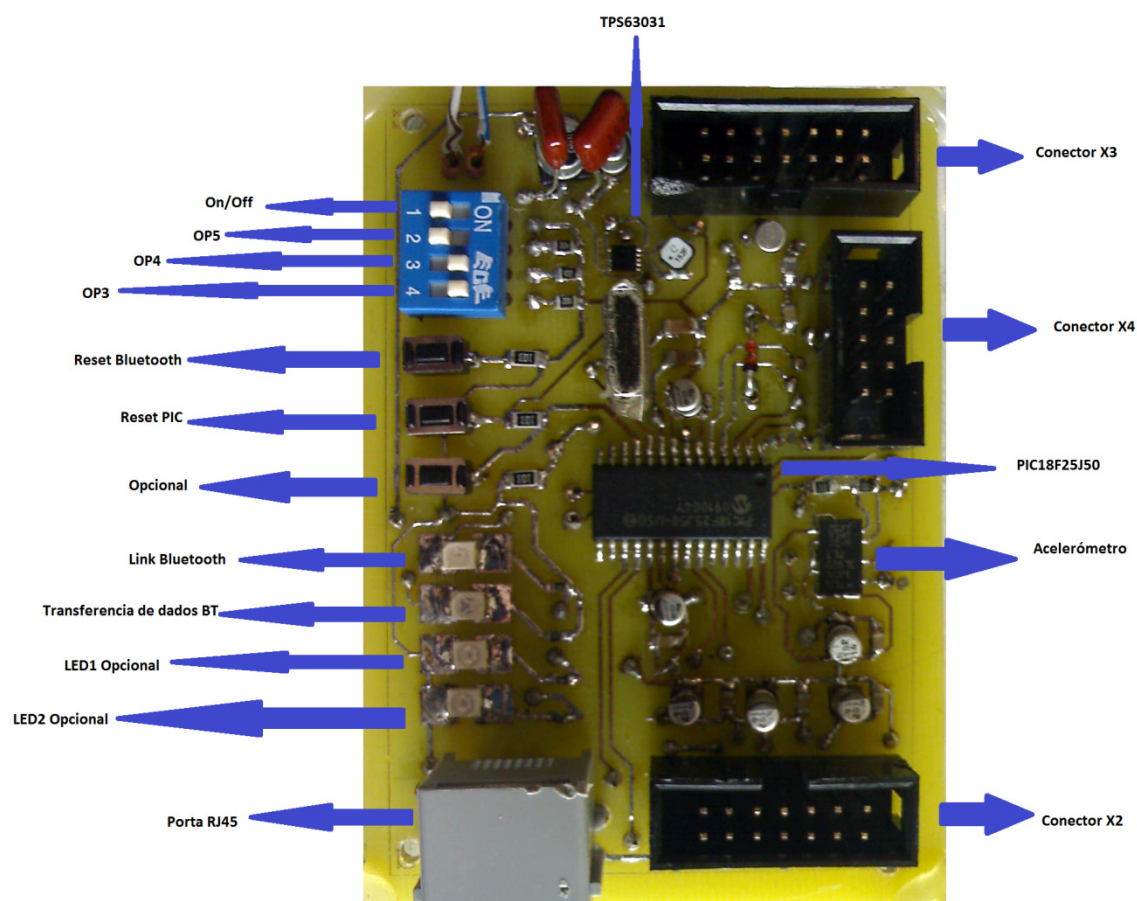


Figura 87 Fotografia do protótipo desenvolvido.

Histórico

- 1 de Novembro de 2010, Versão 1.0, <mailto:1040172@isep.ipp.pt>
- 9 de Dezembro de 2010, Versão 1.1, <mailto:1040172@isep.ipp.pt>

\$Id:MEEC-Tese_Pedómetro-1040172.docx v1.1 Date:9-12-2010\$